

Monitorização de Construções Históricas com base em Sensores Óticos

CARLO PATRÍCIO PEREIRA CADETE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professora Doutor Humberto Salazar Amorim
Varum

Coorientador: Eng.Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita

Coorientador: Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Flor

*“Não procure ser um Homem com êxito,
mas sim um Homem com valores”.*

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

O percurso e a realização deste trabalho nunca estaria completo sem que agradecesse profundamente toda a disponibilidade, compreensão e amizade de todos aqueles que, direta ou indiretamente estiveram envolvidos em mais uma etapa marcante da minha vida.

Sem qualquer ordem de importância, quero em primeiro lugar prestar os meus sinceros agradecimentos a todos dos docentes da FEUP, em particular ao meu orientado, Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, pela partilha de conhecimento, pela orientação e disponibilidade manifestada.

Aos meus coorientadores, Engenheiro Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita e Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes, um muito obrigado pela disponibilidade, simpatia, bem-estar e todo o conhecimento transmitido e partilhado.

Uma palavra de apreço e gratidão ao Doutor Carlos Marques pela forma como contribuiu para alcançar os objetivos do trabalho, dedicando tempo e empenho a causa.

Ao Museu de Arte Sacra e ao Seminário Maior, na pessoa de Dra. Joana Salgueiro, pelo entusiasmo e disponibilidade no decorrer de todo este trabalho.

Agradeço também a todos os amigos, que acompanharam esta aventura, partilhando sorrisos, conhecimento, amizade e muito carinho ao longo de todo o percurso académico, demonstrando o verdadeiro caráter Humano que nos invade. Muito obrigado.

Finalmente à minha maravilhosa família, endereço os meus maiores agradecimentos, por serem os grandes responsáveis por todas as conquistas alcançadas, encorajando e apoiando cada passo desta longa caminhada.

Gostaria ainda, de deixar um agradecimento especial ao Paulo Alves por todo o empenho e dedicação, e essencialmente por me ensinar a SER.

RESUMO

Nos últimos vinte anos, tem surgido um enorme interesse pela preservação do património nacional, dada a importância do valor cultural e arquitetónico destes edifícios históricos, que ainda desempenham um papel essencial na sociedade moderna. Neste prisma, torna-se imprescindível uma avaliação da segurança estrutural destas construções, mas dadas as características inerentes de complexidade elevada neste género de edifícios, torna-se mais difícil essa mesma avaliação

Graças aos avanços progressivos da tecnologia foi possível implementar mudanças estratégicas na observação do comportamento das estruturas, passando de ato pontual para um ato contínuo surgindo assim um novo conceito – Monitorização da Integridade Estrutural. O desenvolvimento de sensores tem tornado cada vez mais fiável e praticável a monitorização deste género de construções e os resultados obtidos no decorrer das investigações sobre este tema, têm evidenciado um elevado potencial dos sistemas de monitorização, e permitem afirmar convictamente que os sistemas de monitorização representam um meio essencial para observar e compreender o comportamento das estruturas.

Neste contexto, a presente dissertação tem vincadamente dois objetivos. O primeiro objetivo é descrever as metodologias atuais no processo de elaboração e conceção de um plano de monitorização, no conceito atual da monitorização estrutural, apoiado num caso prático de monitorização contínua sobre um edifício histórico do Porto, conhecida como a Igreja de São Lourenço ou Igreja dos Grilos.

O segundo, é compreender e aprofundar o conhecimento relativamente às propriedades dos materiais constituintes das alvenarias de perda, passando por uma breve introdução dos conceitos gerais sobre alvenaria e procedendo a um acompanhamento das fissuras mais alarmantes da estrutura, para melhor entender a variação do estado de tensão e deformação nas paredes do edifício em estudo, resultante das variações de temperatura, recorrendo a sensores de fibra ótica com redes de Bragg.

PALAVRAS-CHAVE: Construções Históricas; Alvenaria de pedra; Monitorização Estrutural; Sensores óticos, FBG; Igreja de São Lourenço.

ABSTRACT

Over the last twenty years there has been an increasing interest in preserving National Heritage, due to the cultural and architectural value of these historic buildings, which still play an essential role in modern society. Within this focus, it is imperious to evaluate the structural safety of these constructions, but given the inherent characteristics of high complexity in this kind of buildings, makes this assessment difficult. Based on these properties, historic buildings are becoming attractive to fit in a continuous monitoring system.

Thanks to technology advances, strategic changes have been implemented in the way we observe structural behavior, going from a punctual act to a continuous act of observation, therefore rising a new concept - Structural Health Monitoring. The development of sensors has made monitoring increasingly reliable and feasible, due to the results obtained in the course of investigations on this subject. Therefore, showing a high potentiality of the monitoring systems and allowing to affirm that the monitoring systems represent an essential means to observe and understand the behavior of structures.

In this context, the current thesis has two main objectives. The first objective passes by describing the existing methodologies in the process of designing a monitoring plan in the recent concept of structural monitoring, supported by a practical case of structural monitoring. The historical building and heritage of the Porto, Portugal known as São Lourenço Church.

The second objective is to understand and expand the knowledge around material properties of stone masonry. Passing by a brief introduction of the general concepts of stone masonry and monitoring the most alarming cracks in the structure to better understand the variation of the masonry state tension and deformation, resulting from temperature variations, using fiber Bragg Grating.

KEYWORDS: Historical buildings; Stone masonry; Structural Monitoring; Optical sensors, FBG; São Lourenço Church.

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Abreviaturas

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

MIEC - Mestrado Integrado em Engenharia Civil

DEC - Departamento de Engenharia Civil

SHM - Structural Health Monitoring

ICOMOS - International Council on Monuments and Sites

ISIS - Intelligent Sensing for Innovatives Tructures

MEF - Método dos Elementos Finitos

GPR - Radar de prospeção geotécnica

SAMCO - Structural Assessment, Monitoring and Control

Simbologia

ν - Coeficiente de Poisson

E - Módulo de Elasticidade

γ - Peso Volúmico

λ - Comprimento de Onda

R^2 - Coeficiente de Correlação

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	VII
1 Introdução	15
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	17
2 Estruturas de Alvenaria de Pedra.....	19
2.1. ALVENARIA DE PEDRA	19
2.2. PRINCIPAIS PATOLOGIAS NAS ALVENARIAS DE PEDRA	21
2.3. ANOMALIAS ASSOCIADAS A EDIFÍCIOS HISTÓRICOS	23
2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	27
2.5. PRINCIPAIS MÉTODOS DE INSPEÇÃO E DIAGNOSTICO EM EDIFICADO HISTÓRICOS	28
3 Monitorização Estrutural	31
3.1. DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	31
3.2. EVOLUÇÃO DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	32
3.3. PROJETO DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	34
3.4. CASO PARTICULAR DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL (EDIFÍCIOS HISTÓRICOS)	42
3.5. MODELAÇÃO NUMÉRICO	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
4 Caso de Estudo	48
4.1. IGREJA DE SÃO LOURENÇO.....	48
4.2. PRINCIPAIS INTERVENÇÕES CONSTRUTIVAS OCORRIDAS NA IGREJA DE SÃO LOURENÇO ...	52
4.4. MODELO NUMÉRICO DA IGREJA SÃO LOURENÇO	63
4.5. SENSORES DE FIBRA ÓTICA (SENSORES FBG)	45
5 Monitorização da Igreja de São Lourenço	70
5.1. PLANEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	70
5.2. DESCRIÇÃO DO PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA IGREJA DE SÃO LOURENÇO	71

5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	73
6 Conclusões	82

LISTA DE FIGURES

Fig 1.1 - Analogia entre monitorização estrutural e o procedimento medico adaptado de	16
Fig 2.1 - Componentes da alvenaria de pedra: pedra, argamassa e vazios adaptado de	20
Fig 2.2 - Classificação da secção das paredes quanto ao número de paramentos : (a). Paramento simples. (b). Dois paramentos sem ligação. (c). Dois paramentos com ligação. (d). Três paramentos com núcleo de fraca qualidade.	20
Fig 2.3 - Classificação das alvenarias de pedra quanto ao aparelho e assentamento (adotado	21
Fig 2.4 - Influência recíproca entre os estratos de uma parede de três paramentos, com mecânicas ..	22
Fig 2.5 - Mecanismos de rotura em paredes de alvenaria quando solicitadas no seu plano por cargas horizontais e verticais : (a) parede sob carregamento vertical e lateral; (b) rotura por corte da argamassa nas juntas; (c) a parede funciona monoliticamente exibindo deformabilidade de corte até que os mecanismos internos de tração, associados ao funcionamento por resistência ao corte da parede, rompem; (d) rotação e esmagamento localizado.	22
Fig 2.6 - Instabilização local de uma parede de pedra com fraca ligação transversal entre paramentos	23
Fig 2.7 - Mecanismos de dano sísmico em paredes de edifícios associados à sua fraca ligação das paredes em alvenaria com os restantes elementos estruturais	24
Fig 2.8 - Deformação resultante de movimentos de terras	25
Fig 2.9 - Desagregação de alvenaria antiga: a) desagregação das paredes de alvenaria do Convento Dominicano Serra de Montejunto, Portugal; b) desagregação da alvenaria Roseiro 2012.b)	26
Fig 2.10 - Fendilhação em paredes de alvenaria antiga: a) fendilhação de um pilar da Catedral de Noto após ser removido o reboco; b) padrão típico de fendilhação.	26
Fig 2.11 - Desagregação das paredes de alvenaria do Convento Dominicano Serra de Montejunto, Portugal;	26
Figura 2.13 - As várias fases de monitorização para avaliação e proteção de edifícios. - Poços de sondagem;.....	29
Figura 2.14 - As várias fases de monitorização para avaliação e proteção de edifícios. - Poços de sondagem;.....	29
Fig 2.14 - Esquema representativo das principais estratégias de inspeção e diagnóstico e indicação de alguns exemplos (Adaptado Rego 2016) Métodos não-destrutivos	29
Fig 2.15 - Esquema representativo das principais estratégias de inspeção e diagnóstico e indicação de alguns exemplos	29
Fig 3.1 - Fluxograma de Informação do Monitorização (Adaptado).....	35
Fig 3.2 - Esquema típico do fluxo de informação das componentes da monitorização (adaptado de ISIS 2004) [8].....	37
Fig 3.3 - Sistema de Aquisição e a sua relação com o Sistema de Monitorização adaptado	41

Figura 3.4 - Influência da taxa de conversão de sinal: (a) correta conversão de sinal; (b) incorreta conversão de sinal, com efeito de “aliasing”	41
Fig 3.5 - Relação entre a monitorização e a intervenção com os edifícios históricos.	43
Fig 3.6 - Exemplo de uma malha de elementos finitos da Igreja São Lourenço.	68
Fig 3.7 - Estratégia de modelação para estruturas históricas (adaptado)	68
Fig 4.1 - Localização da Igreja de São Lourenço, Porto. Portugal	48
Fig 4.2 - Igreja de São Lourenço, Porto: a) Fachada frontal da Igreja; b) Maçonaria bem efetuada com articulações horizontais (fachada principal).	49
Fig 4.3 - Planta longitudinal em forma de cruz latina da Igreja de São Lourenço	49
Fig 4.4 - Modelo tridimensional da Igreja de São Lourenço	50
Fig 4.5 - Órgão Ibérico da Igreja de São Lourenço (Grilo).....	52
Fig 4.6 - Estrutura de reforço das coberturas.	57
Fig 4.7 - Coberturas do Museu Seminário Maior/Igreja de São Lourenço.	57
Fig 4.8 - Restauro da parede exterior junto da escadaria de ligação da catedral à Igreja São Lourenço	58
Fig 4.9 - Planta em cruz latina (nave central, crucero e transeptos)	59
Fig 4.10 - Fachada Lateral da Igreja São Lourenço (fachada sul-ocidental) em CAD	59
Fig 4.11 - Fachada frontal da Igreja São Lourenço em CAD.	59
Fig 4.12 - Representação da área em estudo e envolvente (adaptado de).	60
Fig 4.13 - Mapeamento das fissuras principais no interior da igreja.....	61
Fig. 4.14 - Imagens retiradas da termografia efetuada na Igreja de S. Lourenço.	62
Fig 4.15 - Modelo em Autocad®3D da Igreja São Lourenço.	64
Fig 4.16 - Igreja de São Lourenço: (a) Modelo tridimensional importado no ANSYS; (b) Malha utilizada para a discretização do modelo numérico	65
Fig 4.17 - Tensões principais máximas de tração acima 50 kPa.....	66
Fig 4.18 - Reflexão de luz em fibra ótica.....	45
Fig. 4.19 - Esquema do funcionamento de um sensor FBG (adaptado Antunes)	46
Fig. 5.1 - Processos realizados para concretização do plano de monitorização.	72
Fig. 5.2 - Interior da Igreja de São Lourenço: a) capela de Santo Quintério; b) esquema do plano de monitorização.	72
Fig 5.3 - Esquema do plano de monitorização dos sensores OFS-D01 e OFS-D02	75
Fig. 5.4 - Esquema dos deslocamentos medidos com os sensores OFS-01 e OFS-04	77
Fig 5.5 - Esquema dos deslocamentos medidos com os sensores OFS-02	79

LIST OF TABLES

Tabela 2-1 Resistência de cálculo à compressão da alvenaria de pedra (MPa) (adaptado)	27
Tabela 3-1 Nível de monitorização	35
Tabela 3-2 Exemplos de tipos de sensores adaptado	38
Tabela 4-1 - Principais intervenções ocorridas na Igreja São Lourenço	53
Tabela 4-2 Valores considerados dos parâmetros sobre as propriedades mecânicas dos materiais (adaptado)	63
Tabela 4-3 Características mecânicas do material do modelo (adaptado)	65
Tabela 4-4 Os seis primeiros modos de vibração da estrutura e as respetivas frequências naturais.	66

1

INTRODUÇÃO

Nos últimos vinte anos, à semelhança do que acontece com o resto da Europa, Portugal tem assistido a um crescimento no número de intervenções em edificado antigo. Esta necessidade surge, por se tornar indispensável revitalizar os centros históricos no nosso país, mas para isso, é necessário educar os cidadãos no sentido de sensibilizar e relembrar que cada centro histórico não é apenas uma área edificada com interesse de preservação. É necessário fazer sentir o valor patrimonial, cultural e arquitetónico dos edifícios que preservam e relevam a história de Portugal. É importante focar a atenção na reabilitação dos centros históricos, não só do ponto de vista sociocultural, mas também como uma estratégia económica capaz de enaltecer o local e, consequentemente, combater o abandono dos centros das cidades devido aos inúmeros edifícios em avançado estado de degradação por falta de manutenção (Lopes 2011; Marques 2008).

No entanto, quando o assunto da reabilitação incide em edifícios históricos é necessário uma maior atenção e especialização, principalmente porque os edifícios em causa são geralmente de alvenaria de pedra, sinónimo de estruturas bastante complexas (Bisby and Briglio 2004; Marques 2008; Rodrigues 2011).

A preservação e conservação de edificado histórico deve ser encarado como um objetivo primordial uma vez que salvaguarda a transmissão cultural para as gerações futuras e assim, imortalizar a história que nos caracteriza. Com este propósito e à luz do avanço tecnológico nas últimas décadas, os sistemas de monitorização estrutural que recorrem a ensaios *in situ* tem desempenhado um papel muito importante na aquisição de informação de forma a complementar a existente. São casos recentes como Chi-Chi (1999) e Emilia-Romagna (2012) onde danos poderiam ter sido evitados ou minimizados se o dano tivesse sido diagnosticado antecipadamente (Milani 2013). Neste sentido, o recurso a ensaios experimentais *in situ* ou em laboratório constitui o melhor meio para colmatar a escassez de conhecimento sobre o comportamento dos materiais e dos elementos estruturais no seu conjunto (de Almeida 2013). É neste contexto, que surge o interesse pela Monitorização da Integridade Estrutural. Esta estratégia mudou o acompanhamento das estruturas, passando de um ato pontual para um ato contínuo.

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Nas alvenarias, particularmente nos edifícios com valor patrimonial, é importante delinear e encontrar os melhores métodos e técnicas de intervenção, de forma a preservar a integridade do edificado e mantendo os atributos que caracterizam a estrutura. São estes os principais desafios nas construções antigas; no entanto, apesar de muitos estudos científicos levados a cabo por vários investigadores sobre

este tema (Arêde and Costa 2002; Bisby and Briglio 2004; Mesquita 2015; Rodrigues 2011), continua a haver incertezas quanto ao comportamento estrutural e quanto às propriedades dos materiais que constituem as alvenarias devido a sua elevada complexidade. Estas características intrínsecas conferem à estrutura uma complexidade extrema, exigindo um cuidado suplementar no momento da proposta de intervenção.

A monitorização de obras de engenharia tem como principal objetivo avaliar o comportamento das estruturas (através da caracterização, por via da observação, do comportamento físico e mecânico dos materiais e dos seus elementos estruturais) sob vários condicionalismos decorridos num intervalo de tempo ou então durante a vida útil da estrutura.

Utiliza-se a Fig.1.1 para realizar uma analogia com a vertente da saúde, para explicar a importância e o impacto que a monitorização pode trazer, com demonstrados em estudos anteriores (Bisby and Briglio 2004; Figueiredo 2012; Rodrigues 2011). Sucintamente, a Fig.1.1 explica que a integridade de uma estrutura, antiga ou recente, deve ser vigiada como a saúde de um Ser Humano, pois tal como os especialistas na área da saúde, fazem diagnósticos usando dispositivos médicos e exames complementares de diagnóstico de ponta, de forma a avaliar o paciente e procurar uma intervenção adequada para o caso, na engenharia, recorrendo a sensores e técnicas adequadas, as estruturas devem também ser alvo de vigilância constante, aplicando sistemas de monitorização para uma mais rápida e eficaz intervenção dos danos.

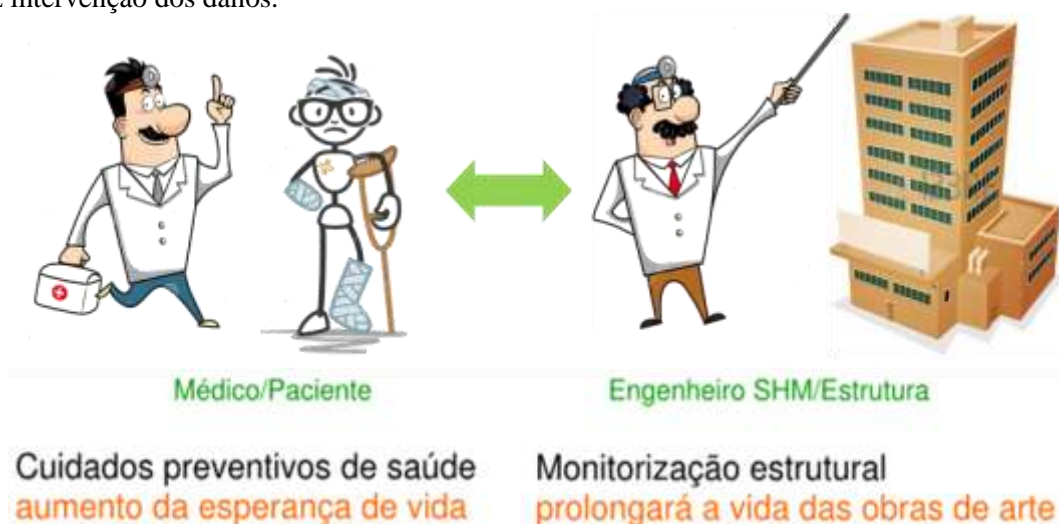


Fig 1.1 - Analogia entre monitorização estrutural e o procedimento médico adaptado de (Bisby and Briglio 2004)

No entanto, é de salientar que nas duas últimas décadas a aplicação de sistemas de monitorização contínua em estruturas de engenharia civil tem tido um crescimento bastante considerável. Contudo, estes sistemas de monitorização eram apenas aplicados essencialmente em grandes estruturas como por exemplo: pontes, viadutos, plataformas offshore, turbinas e túneis sendo pouco explorada a monitorização contínua em monumentos históricos (Fraser, et al. 2009). Graças às políticas de conservação do património cultural dos Comités Internacionais, foi reconhecida a importância das construções históricas da idade contemporânea, tendo sido implementada várias investigações em monumentos históricos (Bisby and Briglio 2004; de Atenas 1999).

A aplicação destas técnicas aliada as tecnologias atuais, visa essencialmente compreender o comportamento estrutural para, conseqüentemente, através das análises dos dados recolhidos durante a monitorização, proceder a um plano de intervenção se necessário. Este progressivo avanço tecnológico dos sensores e sistemas de aquisição, dos sistemas de comunicação, dos computadores e do recurso a

capacidades incrementadas pela informática, possibilitam o acompanhamento das estruturas através de sistema de monitorização.

O acompanhamento das estruturas, permite uma maior precisão na deteção de anomalias e a avaliação dos seus efeitos no comportamento da estrutura, e ainda controlar as deformações nos elementos estruturais. É de salientar que esta tipologia de avaliação da integridade estrutural aprofunda o conhecimento do comportamento estrutural e, conseqüentemente, o refinamento das metodologias praticadas. É com esse interesse que surge o projeto da presente dissertação, apoiada num caso prático de monitorização da Igreja São Lourenço popularmente conhecida como Igreja dos Grilos, situada na zona Episcopal da cidade do Porto, Portugal.

1.2. OBJETIVOS

A instalação de sistemas de monitorização com o objetivo de avaliar o comportamento e integridade das estruturas é uma necessidade emergente pelo seu profundo contributo no conhecimento do comportamento estrutural cada vez mais exigente, aperfeiçoando assim as metodologias existentes.

Neste contexto esta dissertação tem vincadamente dois objetivos, apoiado num contexto prático, sendo a Igreja de São Lourenço o caso de estudo:

Elaboração e implementação de um plano de monitorização, partindo das metodologias atuais e do conceito atual da monitorização estrutural.

Compreender e aprofundar o conhecimento relativamente as propriedades mecânicas dos materiais constituintes das alvenarias de pedra.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresenta-se organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo diz respeito ao enquadramento geral do tema da dissertação, destacando alguns pontos relevantes para a concretização da mesma.

No segundo capítulo é realizada uma descrição dos principais conceitos sobre alvenaria, salientando as principais patologias e anomalias, as propriedades e ainda referindo os principais métodos de inspeção e diagnóstico em edifícios históricos.

No terceiro capítulo é apresentada a monitorização estrutural, abordando ao longo do capítulo os conceitos para a compreensão do tema, assim como a definição e os objetivos da monitorização. Neste capítulo, é ainda refletida a evolução da monitorização estrutural, expondo sucintamente, a descrição geral dos componentes de um sistema de monitorização e os procedimentos e decisões a tomar num projeto de monitorização e ainda, realçada a importância da modelação numérica como uma ferramenta na monitorização.

O quarto capítulo, desenvolve-se em torno do caso prático, a Igreja de São Lourenço. Inicia-se o capítulo com uma introdução do caso de estudo, descrevendo a história do edifício. Nessa análise histórica é discutido sobre as intervenções que a Igreja já esteve submetida, destacando algumas das muitas intervenções que a Igreja já esteve sujeita desde o século XVI. Posteriormente, é efetuada uma caracterização estrutural, onde se enfatizou a caracterização geométrica, material e de danos. Por fim, apresentou-se um modelo numérico da Igreja que servirá de apoio para tomadas de decisão e aprofundar o conhecimento da estrutura.

No quinto capítulo, procede-se à discussão das considerações a ter em conta no momento de implementar um plano de monitorização, descrevendo o plano de monitorização adotado neste caso de estudo. Por fim, são analisados e debatidos os resultados obtidos da monitorização efetuada.

Por fim, no capítulo seis, procede-se à discussão das conclusões retiradas do estudo, abrindo portas e sugerindo trabalhos de investigação a serem desenvolvimentos no futuro próximo de forma a contribuir para o conhecimento da comunidade científica.

2

ESTRUTURAS DE ALVENARIA DE PEDRA

A alvenaria em pedra é dos processos construtivos mais antigas existentes e a sua presença faz-se sentir por todo o mundo. A presença de estruturas de alvenaria de pedra antiga está geralmente relacionada com os centros históricos e urbanos, pois era o processo mais usual em tempos antigos, implementada em todo o género de estruturas tais como igrejas, torres, arcos, muros, muralhas, etc. Geralmente, estas construções conferem características bastante únicas como grande heterogeneidade devido aos diferentes materiais e técnicas utilizadas no decorrer dos anos (de Almeida 2013).

Neste capítulo, será apresentada uma breve introdução sobre construções em alvenaria de pedra, assim como uma revisão sucinta sobre as diferentes tipologias/morfologias e suas principais características mecânicas das paredes de alvenaria. Serão ainda descritas as principais patologias e anomalias nas alvenarias dos edifícios históricos.

Por último, será abordado o tema dos principais métodos de inspeção e diagnóstico em edifícios históricos com paredes de alvenaria.

2.1. ALVENARIA DE PEDRA

A palavra “alvenaria” refere-se a um processo construtivo em que através da associação de vários elementos sobrepostos se consegue formar um conjunto compacto, com ou sem um ligante entre si. Os elementos resistentes dos quais habitualmente; tijolo, blocos de betão ou pedra, juntamente com (alvenaria de junta argamassada) ou sem (alvenaria de junta seca) a argamassa são os responsáveis pela resistência estrutural.(de Almeida 2013; Roque 2002).

Nas alvenarias, principalmente nas de pedra, o material é bastante heterogéneo. Esta heterogeneidade das alvenarias antigas advém de múltiplos facotes, provenientes das argamassas e das pedras usadas. Geralmente, as argamassas são baseadas em cal e terras tendo como principal função unir os elementos resistentes. Quanto às pedras usadas em construções de alvenaria, estas obedecem a regras (estereotomia) que garantam a sua estabilidade com apenas o seu peso próprio e apresentam diferentes características; quanto à sua natureza (ígneas, sedimentares e metamórficas), quanto à sua forma e quanto às suas dimensões. Outra característica intrínseca é a presença de cavidades ou vazios no interior das alvenarias, como se pode verificar na Fig. 2.1, onde se ilustra as componentes numa parede de alvenaria de pedra.

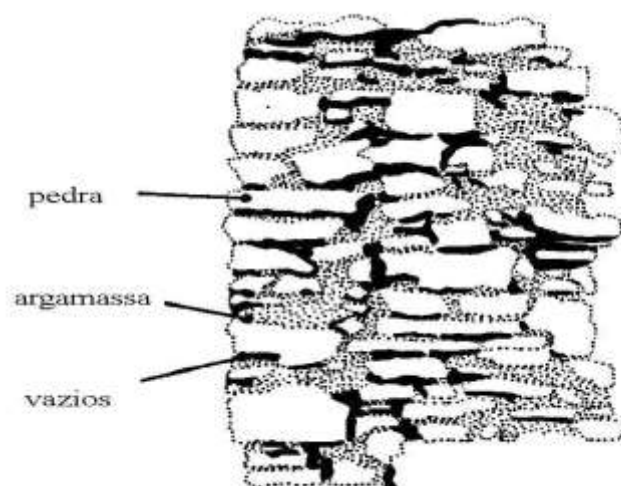


Fig 2.1 - Componentes da alvenaria de pedra: pedra, argamassa e vazios adaptado de (Binda, et al. 2000)

É de salientar que a utilização de produtos pré-fabricados como os tijolos de adobe e blocos de betão tem características mais regulares, o que confere uma maior homogeneidade ao produto final (Binda, et al. 2000).

De um modo geral, a alvenaria apresenta uma boa resistência à compressão devido às características dos elementos resistentes. Por outro lado, e devido às matérias usadas como ligantes, as alvenarias exibem fraca resistência a esforços de tração e uma fraca resistência ao corte, fruto da fraca qualidade dos materiais e da excessiva presença de vazios.

De acordo com Roque (Roque 2002), as paredes de alvenaria apresentam três tipologias importantes relativamente à secção transversal, mais propriamente quanto ao número de paramentos. As paredes podem ser de paramento simples, duplo ou triplo como ilustrado na Fig. 2.2.

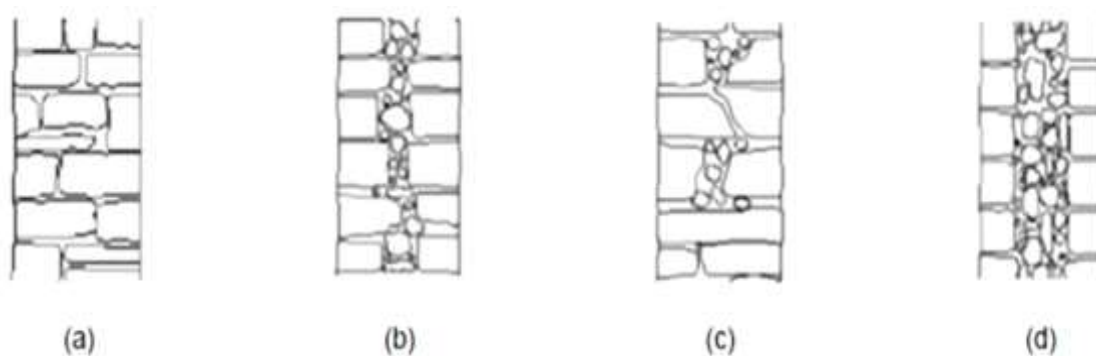


Fig 2.2 - Classificação da secção das paredes quanto ao número de paramentos (Binda, et al. 2000): (a). Paramento simples. (b). Dois paramentos sem ligação. (c). Dois paramentos com ligação. (d). Três paramentos com núcleo de fraca qualidade. (Binda, et al. 2000; Roque 2002)

Ainda relativamente à análise geométrica dos elementos das alvenarias, estas têm a sua designação atribuída em função do tipo de aparelho (disposição geral das pedras no plano da parede) e do assentamento das pedras (modo como as pedras são assentes e aparência final). A Fig. 2.3 ilustra a classificação das alvenarias de pedra quanto ao seu aparelho e assentamento (de Almeida 2013).

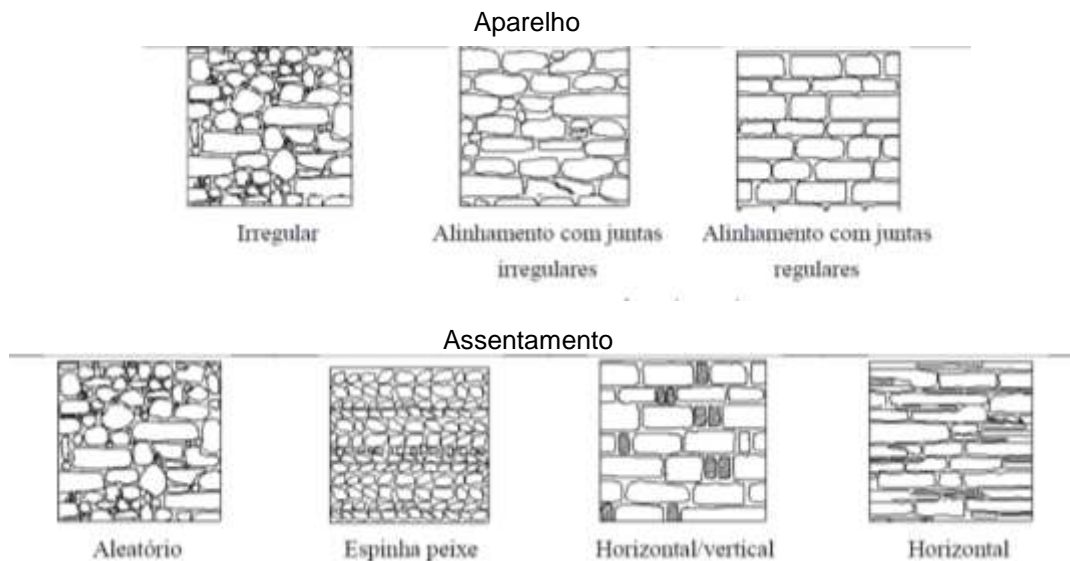


Fig 2.3 - Classificação das alvenarias de pedra quanto ao aparelho e assentamento (adotado (de Almeida 2013))

Quanto ao seu **aparelho**, as paredes de alvenaria podem ser designadas de três modos distintos:

- Irregular e aleatória: quando formadas por pedras toscas e angulosas, dispostas sem qualquer alinhamento específico;
- Alinhamento com juntas irregulares: paredes constituídas por elementos com forma pouco regular dispostos segundo um dado alinhamento;
- Alinhamento com juntas regulares: paredes constituídas por elementos de forma regular dispostos segundo um alinhamento horizontal.

Quanto ao **assentamento**, as paredes de alvenaria podem ser designadas de quatro modos distintos:

- Aleatório: as pedras dispostas não apresentam qualquer tipo de ordem;
- Espinha de peixe: as pedras são dispostas segundo uma linha de convergência;
- Horizontal/Vertical: as pedras são dispostas segundo um plano horizontal e vertical;
- Horizontal: as pedras são alinhadas preferencialmente segundo um plano horizontal.

2.2. PRINCIPAIS PATOLOGIAS NAS ALVENARIAS DE PEDRA

As patologias inerentes às construções em alvenaria de pedra, originando danos nefastos na segurança da estrutura, podem ser divididas em duas origens. **As patologias inerentes ao comportamento estrutural**; e as **patologias inerentes ao comportamento material**. No entanto, é importante salientar que as patologias nas alvenarias de pedra manifestam-se como uma combinação destas duas vertentes, tornando difícil atribuir uma origem específica.

A patologia inerente ao comportamento estrutural está mais associada aos aspetos relacionados com as conceções e as técnicas utilizadas, enquanto que, a patologia inerente ao comportamento material está

relacionada com as características do material utilizado e a tipologia da secção transversal adotada. Com tudo, nas alvenarias de pedra, o aparecimento de algumas patologias é mais frequente que outras, tendo a sua origem associada às seguintes causas (Roque 2002; Silva 2008):

- Fraca resistência a esforços de tração devido à ineficiência das argamassas, levando a fraca resistência a esforços de flexão global;
- Resistência à compressão comprometida devido à dependência do grau de confinamento transversal dos paramentos. Geralmente em paredes compostas (três panos), o núcleo é tendencialmente um material com fracas características mecânicas, mas com a devida compactação há, tendencialmente, uma distribuição de tensões não-uniformes e uma clara tendência para a deformação que pode levar à expulsão dos paramentos exteriores, tal como ilustrado na Fig. 2.4.

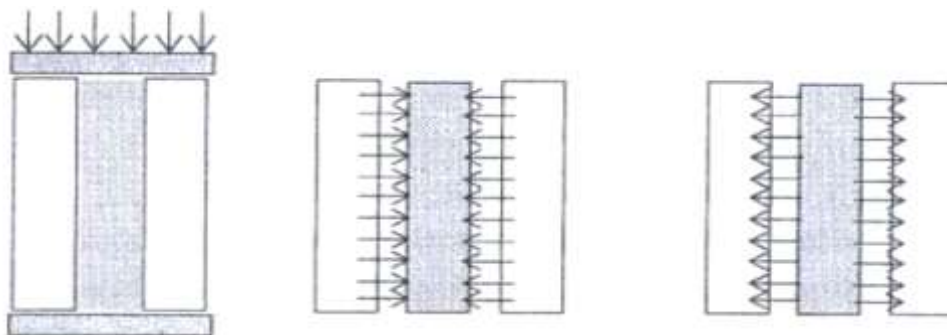


Fig 2.4 - Influência recíproca entre as folhas de uma parede de três paramentos, (Silva 2008)

- Fraca resistência ao corte, muito por culpa das baixas capacidades resistentes da argamassa a tensões de corte, formados no funcionamento global da parede quando submetida a cargas horizontais no plano como se verifica na Fig. 2.5.

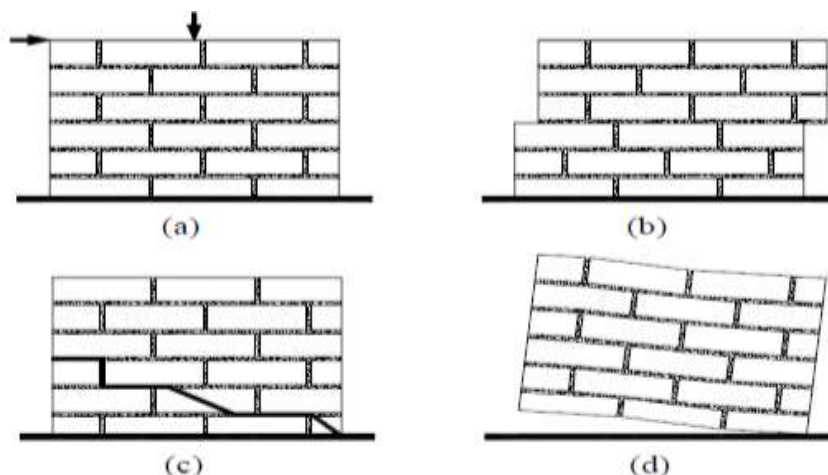


Fig 2.5 - Mecanismos de rotura em paredes de alvenaria quando solicitadas no seu plano por cargas horizontais e verticais (Roque 2002): (a) parede sob carregamento vertical e lateral; (b) rotura por corte da argamassa nas juntas; (c) a parede funciona monoliticamente exibindo deformabilidade de corte até que os mecanismos internos de tração, associados ao funcionamento por resistência ao corte da parede, rompem; (d) rotação e esmagamento localizado.

Quando as paredes de alvenaria estão sujeitas a carregamentos horizontais ou quando existe uma excentricidade nas cargas verticais, geralmente as alvenarias apresentam instabilidades o que desencadeia um mecanismo de rotura local ou global tal como ilustrado na Fig 2.6.

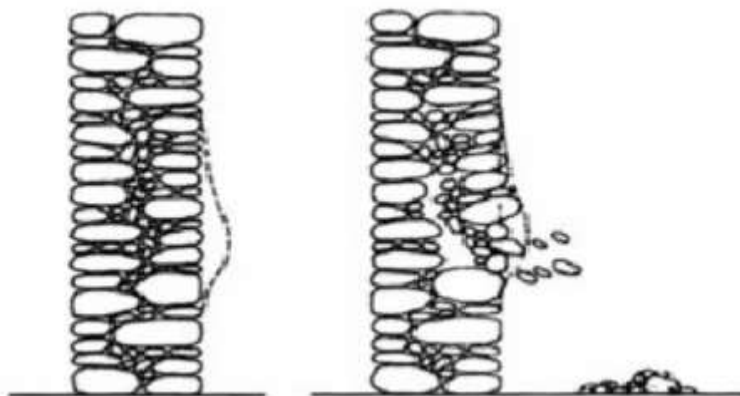


Fig 2.6 - Instabilização local de uma parede de pedra com fraca ligação transversal entre paramentos (Binda, et al. 2000)

Estes fenómenos de instabilidade estão geralmente associados a várias causas tais como: fraca ligação transversal entre os paramentos da secção da parede; fraca ductilidade das alvenarias; e fraca capacidade de dissipar a energia acumulada, principalmente sob a ação sísmica, ocorrendo desagregação dos paramentos desenvolvendo assim um mecanismo de rotura. (Roque 2002).

2.3. ANOMALIAS ASSOCIADAS A EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

Torna-se ainda relevante referir os aspetos relacionados com a insuficiente ligação entre os elementos resistentes, como é o caso das ligações entre as paredes ortogonais, principalmente sob ações sísmicas, facto que aumenta a probabilidade do derrube das fachadas exteriores, bem como, a deficiente ligação entre os pavimentos/coberturas e as paredes resistentes que os sustentam, como pode ser observado na Fig. 2.8.

A ligação entre as paredes transversais tem um papel importante na segurança da estrutura, especialmente quando as alvenarias estão sujeitas a ações sísmicas, pois, há uma clara tendência para a separação destas através da formação de fendas verticais podendo resultar em grandes danos na estrutura ou até colapso da mesma.

Seja a construção antiga ou não, a principal causa do surgimento de anomalias está diretamente ligada a fenómenos naturais. A degradação progressiva dos materiais no tempo, é agravada pela presença de humidades, variações térmicas ambientais, deslizamentos do terreno, ventos e outras vibrações induzidas pelo tráfego contemporâneo e ainda pelo tocar do sino nas igrejas. No entanto, estas anomalias em grande parte dos casos poderiam ser evitadas ou atenuadas com medidas de manutenção e conservação, principalmente no âmbito do património histórico. Neste sentido, é importante recorrer a técnicas não intrusivas sendo necessário o acompanhamento da obra por parte de uma equipa de especialistas (Pinho 2007; Roseiro 2012).

As anomalias neste género de edifícios não são apenas provenientes de causas naturais (Roseiro 2012). A má conceção e planeamento por parte das equipas responsáveis com pouca especialização, também contribui para o aparecimento de anomalias, como por exemplo: aquando de uma remodelação, o

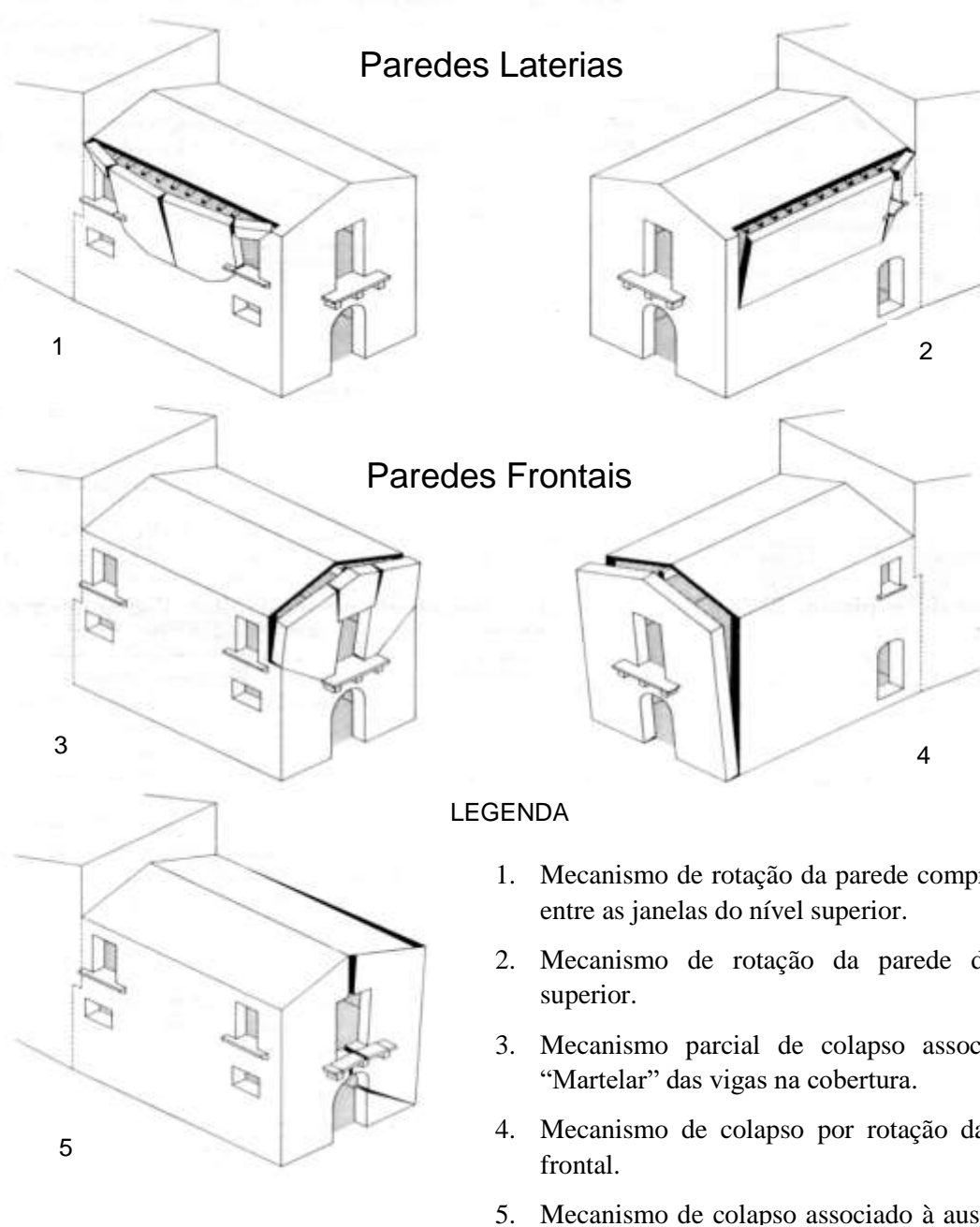


Fig 2.7 - Mecanismos de dano em paredes de edifícios associados à sua fraca ligação das paredes em alvenaria com os restantes elementos estruturais (Silva 2008).

aumento da massa da construção por substituição de pavimentos de madeira por lajes de betão armado; o aumento de número de pisos (aumento das cargas); ou ainda, o corte de vigas do pavimento para introdução de canalização de águas de esgotos e eletricidade, são apenas algumas das demais situações praticadas que geram anomalias tais como fissuras, que é a anomalia mais frequente nas alvenarias.

A anomalia aumento das cargas, tal como foi mencionado acima, requer uma devida observação e análise, pois sem o reforço estrutural, leva geralmente ao incremento das tensões nas fundações o que consequentemente, poderá provocar danos muitas vezes irreversíveis. No entanto, as anomalias nas fundações de edifícios históricos não têm a sua origem relacionada apenas com o aumento das cargas,

mas também com a alteração ou movimento das terras em redor. Em grande parte dos casos, a alteração do solo de fundação está relacionado com: escavações na proximidade; abertura de túneis ou galerias, ilustrada na Fig. 2.7.



Fig 2.8 - Deformação resultante de alterações do terreno (Roseiro 2012)

Estas alterações do solo de fundação, posteriormente resultam em deformações que consequentemente introduzem fissuras e alterações geométricas relevantes nas estruturas de alvenaria. Por causa do corte ou flexão no plano da parede, a fissuração apresenta padrões de fendas verticais, horizontais e inclinadas, normalmente junto aos cantos das aberturas (Pinho 2003; Pinho 2007). As anomalias mais frequentes em paredes de alvenaria de edificado histórico podem ser resumidos da seguinte forma (Pinho 2003):

1. Fendilhação ou fissuração;
2. Desagregação;
3. Esmagamento;
4. Anomalias resultantes da ação da água;
5. Anomalias resultantes da ação de agentes biológicos;
6. Corrosão;
7. Degradação por agentes naturais.

De entre as anomalias referidas a cima, destacam-se duas: as fendilhações e a desagregação, pois surgem com maior frequência nas estruturas de alvenaria e são as que mais perturbam o edificado antigo.

Fendilhação ou Fissuração

A fendilhação é uma das principais anomalias em edifícios antigos, assim como em edifícios mais recentes. O seu aparecimento pode ter várias origens, tendo como locais mais frequentes de aparecimento zonas com aberturas, como portas e janelas, bem como, em muitos casos na ligação de paredes ortogonais, principalmente nos cantos. Habitualmente, estes cantos são os locais onde ocorrem

concentrações de tensões que dão origem ao início e posteriormente à progressão da fendilhação, tal como é ilustrado na Fig. 2.10.



Fig 2.10 - Fendilhação em paredes de alvenaria antiga: a) fendilhação de um pilar da Catedral de Noto após ser removido o reboco; b) fendilhação por corte (Pinho 2007).

Podemos acrescentar ainda que a fendilhação sendo um fenómeno que ocorre na estrutura e está associado as ações que criam esforços nos materiais, não tem capacidade de resistir, principalmente à tração e à flexão. Um dos exemplos mais habituais de tais ações, são os assentamentos diferenciais da estrutura. Reforça-se ainda, que a fendilhação é agravada na presença de água e a forma como esta anomalia progride depende de vários fatores, um dos quais a constituição e qualidade dos materiais (Binda, et al. 2000; Roseiro 2012)

Desagregação

A desagregação das alvenarias é uma anomalia que surge relacionada a outras anomalias tais como a fendilhação, a variação térmica e a qualidade dos materiais.

A presença de fendas nas alvenarias agrava a desagregação dos materiais pois, está associado a infiltrações de água que acabam por desgastar os materiais como mostra a Fig. 2.11.



Fig 2.11 - Desagregação das paredes de alvenaria do Convento Dominicano Serra de Montejunto, Portugal;

Associada a estas, temos ainda a variação térmica, provocando contrações e expansões nos materiais constituintes das alvenarias, criando esforços que levam ao aparecimento de novas fendas.

Tal como se verifica nas imagens, esta anomalia tem como locais de aparecimento mais frequentes as paredes exteriores, por se encontrarem mais expostas às ações climáticas como o vento, chuva, neve e têm como local mais sensível e alarmante junto ao rés-do-chão dos edifícios. A desagregação das alvenarias é ainda responsável pela alteração das características mecânicas, principalmente na redução da resistência à compressão e ao corte (Roseiro 2012).

2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são uma peça chave na modelação numérica pois, é graças ao conhecimento das mesmas que é possível conceber um modelo numérico para estimar com algum rigor a rigidez dos elementos constituintes das alvenarias. Uma vez conhecidos os parâmetros mecânicos, essencialmente, o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e o peso específico (γ) é possível conhecer as deformações e a distribuição dos esforços na estrutura. No entanto, para avaliar o grau de segurança da estrutura é necessário conhecer as tensões de rotura dos materiais tanto a tração com a compressão e ainda ao corte.

Independentemente do fim, o conhecimento das propriedades dos materiais que constituem a alvenaria, desde a composição da argamassa às características químicas, físicas e mecânicas contribuem para melhorar as metodologias existentes.

Por outro lado, a caracterização mecânica das alvenarias antigas apresenta uma dificuldade acrescida devida à heterogeneidade inerente a este género de estruturas e, por vezes, devido a falta de informações aquando da conceção da estrutura ou de alterações efetuadas sem registo ou relatos das mesmas (Roque 2002).

Os vários estudos realizados pelos diversos investigadores na área, com a finalidade de identificar as características morfológicas, mecânicas e a composição, têm dado um enorme contributo para a caracterização das alvenarias pois, assim torna-se mais fácil definir os parâmetros para utilizar nos modelos numéricos. No entanto, é importante relembrar que nos modelos numéricos recorre-se a simplificações grosseiras de homogeneidade e isotropia, dada a natureza complexa do comportamento destes materiais.

Na falta de ensaios de compressão, para alvenarias de pedra (alvenarias ordinárias e alvenarias de cantaria), a resistência de calculo pode ser avaliada, empiricamente a partir da menor resistência à compressão, para cada classe de pedra e em função da argamassa das juntas, desde que as cargas atuem uniformemente distribuídas. Recorrendo a Tabela 2.1, é possível obter um valor de referência para a resistência à compressão das alvenarias de pedra para a caracterização mecânica (Roque 2002).

Tabela 2-1 Resistência à compressão da alvenaria de pedra (MPa) (adaptado (Roque 2002))

Tipo de Pedra	Resistência da pedra (MPa)	Alvenaria de Cantaria			Alvenaria ordinária		
		Seca. Pedra com bom	Silhares $h > 30$ cm	Silhares $h < 30$ cm	Pedras lamelares	Pedras poligonais de faces	Seca

		ajuste das faces	Argamassa M4	Argamas sa M4	Argamassa M4	regulares Argamassa M4	
<ul style="list-style-type: none"> Granito Sienito Basalto 	>100	8.0	6.0	4.0	2.5	1.0	0.7
<ul style="list-style-type: none"> Arenito quartzoso Calcário Mármore 	>30	4.0	3.0	2.0	1.2	0.8	0.6
<ul style="list-style-type: none"> Arenito calcário Calcário brando 	>10	2.0	1.5	1.0	0.8	0.6	0.5

2.5. PRINCIPAIS MÉTODOS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO EM EDIFICADO HISTÓRICOS

Os métodos de inspeção e diagnóstico, com finalidade de caracterizar o estado de conservação e segurança estrutural de um edifício histórico, devem ter em conta, para uma correta avaliação, o histórico das intervenções efetuadas, nomeadamente as transformações e intervenções a que a estrutura foi submetida, isto é, **a evolução histórica da estrutura em termos construtivos**. Assim sendo, é possível efetuar uma avaliação mais eficiente dos problemas estruturais e consequentemente determinar suas causas.

Nas estruturas de alvenaria de pedra, o diagnóstico experimenta varias fases, das quais destacam-se:

- a observação preliminar;
- o levantamento geométrico da construção;
- a identificação do funcionamento estrutural;
- a identificação e monitorização das anomalias;
- a definição dos métodos ou ensaios a concretizar com a finalidade de identificar as causas das anomalias.

Quanto aos principais elementos a ensaiar relativamente à inspeção e diagnóstico de anomalias, estas podem ser divididas em dois grupos, as fundações e as paredes.

No que diz respeito as fundações, os principais ensaios na inspeção e diagnóstico efetuados são: os poços de sondagem; e as sondagens geotécnicas em profundidade. Relativamente as paredes, existem diversos ensaios/métodos de inspeção e diagnóstico, sendo classificadas em métodos não destrutivos, semi-destrutivos e destrutivos.(Roseiro 2012).

A Fig. 2.12, apresenta um esquema sintetizado dos métodos/ensaios segundo as suas classificação e designação.

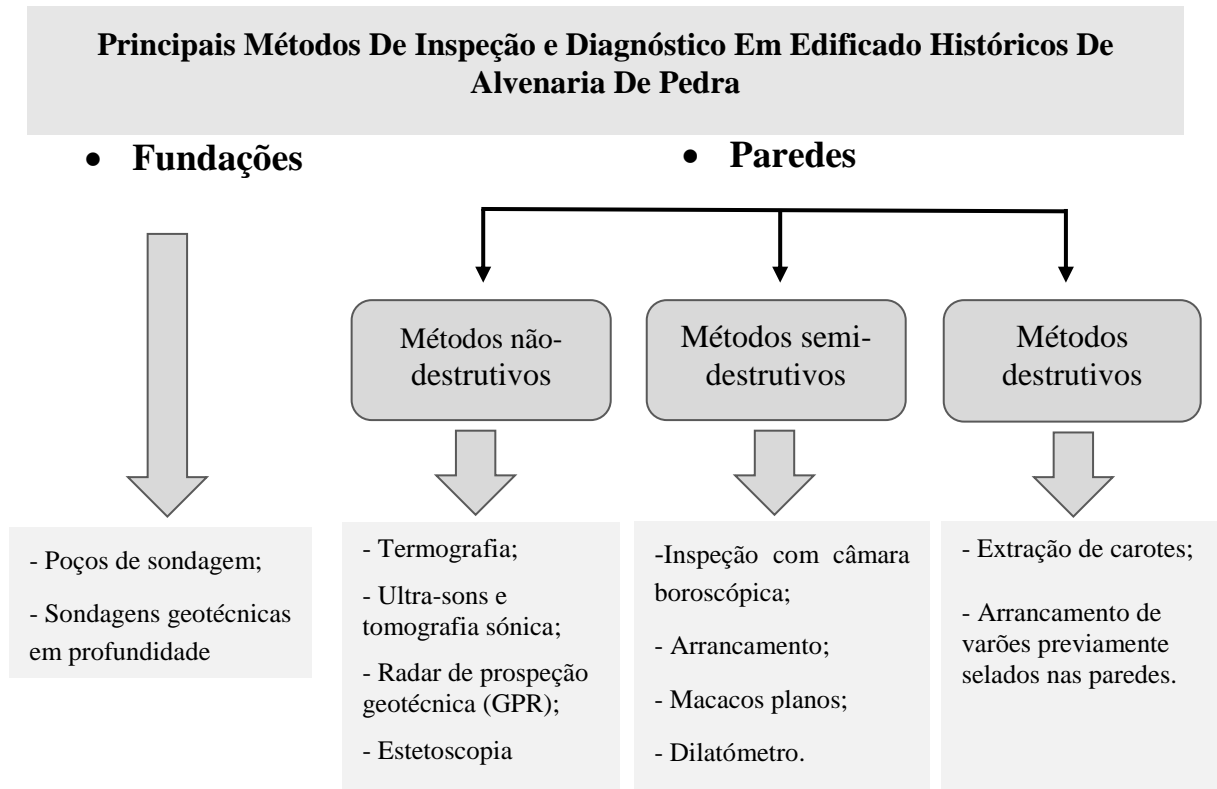


Fig 2.15 - Esquema representativo das principais estratégias de inspeção e diagnóstico e indicação de alguns exemplos

Métodos não-destrutivos: estes ensaios caracterizam-se pela ausência de uma ação invasiva ou destrutiva no elemento a inspecionar, possibilitando a obtenção de alguns parâmetros qualitativos a fim de caracterizar o comportamento dos elementos estruturais, bem como permitir a identificação de anomalias ocultas. Os principais métodos não-destrutivos efetuados são:

- Termografia;
- Ultra-sons e tomografia sónica;
- Radar de prospeção geotécnica (GPR);
- Estetoscopia.

Métodos semi-destrutivos: estes ensaios provocam algumas perturbações nos elementos, designadamente uma ligeira destruição das alvenarias, com pequenos rasgos ou orifícios, permitindo, contudo, fornecer uma informação mais fiável e detalhada do interior das paredes, em relação aos ensaios não-destrutivos. Os principais métodos semi-destrutivos são:

- Inspeção com câmara boroscópica;
- Humidade superficial;
- Arrancamento;
- Macacos planos;
- Dilatómetro.

Métodos destrutivos: estes tipos de ensaios, permitem analisar o interior da parede de um edifício antigo. Porém, apresentam uma ação muito intrusiva na parede, pelo que devem ser evitados sempre que possível, essencialmente em edifícios ou monumentos históricos uma vez que não mantem a integridade da estrutura. Os principais métodos destrutivos realizados são:

- Extração de carotes;
- Arrancamento de varões previamente selados nas paredes.

Estes ensaios complementam o conhecimento das características físicas e mecânicas e ainda servem para a calibração dos modelos estruturais. Não obstante, recorrer a simplificações grosseiras, de homogeneidade e isotropia são hipóteses assumidas na análise numérica de estruturas de alvenaria, dada a natureza complexa do comportamento destes materiais (Roque 2002).

3

MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

A preservação e conservação de edificado com valor patrimonial recorrendo a sistemas de monitorização é uma disciplina desenvolvida pela engenharia civil nas ultimas décadas, o que possibilita uma melhor análise e controlo do desempenho estrutural. Nesse sentido, o presente capítulo tem como objetivo percorrer de forma sintética a evolução da monitorização estruturas ate aos dias que correm, e ainda descrever os principais objetivos e requisitos a ter em conta num projeto de monitorização e na altura da implementação de um sistema de monitorização.

3.1. DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

A monitorização estrutural, Structural Health Monitoring (SHM) é uma metodologia que avalia o comportamento da estrutura *in-situ*, num determinado intervalo de tempo ou durante todo o período de vida útil da estrutura, com a finalidade de compreender a tendência e o presente estado de dano com intuito de otimizar as intervenções sob os edifícios e prevenir danos futuros (Farrar and Worden 2007) (Martins, et al. 2014).

Conhecer a integridade das estruturas em serviço em tempo real de forma contínua tem evidenciado interesse na comunidade científica relacionada com a engenharia, em particular para a engenharia civil nas últimas décadas pois, em muitos casos as estruturas são submetidas a ações naturais, a riscos ambientais e a cargas excessivas do qual não foram consideradas na fase de projeto (Mesquita, et al. 2016). Por outro lado, a vida útil de uma estrutura depende de um vasto leque de parâmetros, tais como: qualidade dos materiais; métodos construtivos; projetos adequados; e a execução/existência de manutenção. É assim, prática corrente considerar que a adoção de medidas de manutenção condiciona o tempo de vida da estrutura.

Sobre o ponto de vista da manutenção, a Structural Health Monitoring alterou drasticamente a organização do trabalho dos serviços de manutenção, substituindo parcialmente a inspeção de manutenção programada e periódica, pela manutenção continua recorrendo ao desempenho da estrutura, melhorando a segurança e a fiabilidade estrutural (Lorenzoni 2013).

De certa forma, SHM pode ser entendido como um método não destrutivo de avaliação estrutural (Bisby and Briglio 2004) No entanto, Structural Health Monitoring não se resume a diagnosticar o estado das estruturas, mas também podem ser usadas para fazer previsões dos dados que poderão ocorrer na

estrutura. São casos recentes como Chi-Chi (1999) e Emilia-Romagna (2012) onde danos poderiam ter sido evitados ou minimizados se o dano tivesse sido diagnosticado antecipadamente (Milani 2013).

Estas alterações drásticas na filosofia da manutenção de segurança estrutural e identificação de danos aplicados em grandes infraestruturas, mas também mais recorrente nos últimos anos em edifícios residências, comerciais e principalmente em monumentos históricos, são narrados/descritos em (de Battista, et al. 2015; Zhu and Frangopol 2013).

3.2. EVOLUÇÃO DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

Desde as primeiras civilizações que o Homem percebeu a importância e a necessidade da segurança e conforto nas infraestruturas, o que motivou o desenvolvimento da construção civil. Por outro lado, devido a fatores externos como as características dos materiais, as ações ambientais e as cargas excessivas, conduziam à degradação das construções, evidenciados pelos danos que surgiam na estrutura. É neste contexto que surge a necessidade de implementar métodos capazes avaliar a segurança estrutural.

Esta avaliação estrutural consistia na deteção dos danos e possíveis consequências na segurança da estrutura pois, os danos devem ser entendidos como o resultado das alterações nefastas nas propriedades do material provocado por agentes físicos, químicos biológicos e humanos, afetando negativamente a durabilidade e segurança estrutural.(Sohn, et al. 2003)

Na década de 60, fez-se sentir uma maior implementação dos testes não-destrutivos nos trabalhos de investigação, surgindo novos métodos, aplicados em estruturas reais que levou a evolução da avaliação estrutural. No entanto, a implementação da monitorização estrutural teve uma limitação devido aos modelos numéricos. Um dos estudos mais relevantes e pioneiros na SHM foi desenvolvido por Lifshitz e Rotem em 1969, onde a mudança de frequências naturais (Análise Vibratório) foram utilizados na deteção de danos(Mesquita, et al. 2016).

A deteção de danos através da análise vibratória assentando num princípio básico em que os parâmetros modais da estrutura (frequência natural, forma modal e amortecimento modal) podem ser definidos através de parâmetros físicos (massa, amortecimento e rigidez) onde qualquer mudança nestes parâmetros físicos resulta em variações nas propriedades modais entre elas a mudança da frequência natural. Assim, foi possível desenvolver vários estudos que, consequentemente, resultam em novas metodologias para deteção de danos com base em análise de vibração, onde foram explorados a influência entre a degradação do material e os parâmetros físicos das estruturas(Mesquita, et al. 2016).

No entanto, a caracterização de danos pode ser efetuada através de outros métodos não-destrutivos baseados na radiografia, na acústica, corrente de Foucault, térmica e mais recentemente métodos óticos(Doebling, et al. 1998; Doebling, et al. 1996).

Foi graças à observação das alterações no espectro de frequências naturais induzidas pelas variações das propriedades físicas dos elementos estruturais, que deram início ao uso de alterações de frequência para deteção de danos estruturais. Por outro lado, este tipo de análise, recorrendo as frequências naturais, apresentou algumas limitações, especialmente na deteção de pequenas fissuras e na diferenciação da natureza dos danos. Em muitos casos, estes métodos fornecem uma análise global da integridade da estrutura, não dando a localização do dano. Uma outra limitação reconhecida recai sobre o efeito ambiental como a temperatura ou o vento. Tanto a temperatura como o vento causam mudanças nas frequências estruturais que levam muitas vezes a interpretações incorretas sobre a ocorrência de dano.

É importante salientar que este problema/limitação tende a ser menos nefasto quanto maior for o número de pontos monitorizados e quanto menos complexa for a estrutura a monitorizar (Farrar and Worden 2007; Worden, et al. 2007).

Entre os anos de 1975 e 1996 foram desenvolvidos vários estudos em volta do fenómeno de mudanças de frequências naturais onde apresentaram uma série de dados sobre comportamento estrutural sob ações ambientais variáveis, complexidade estrutural e diferentes programas experimentais. No entanto, só foram possíveis avanços nos métodos de identificação de danos, caracterização de danos, localização e aspetos geométricos devido a introdução de modelos numéricos (Doebbling, et al. 1996; Sohn, et al. 2003). No entanto, apesar da implementação dos modelos numéricos na deteção de danos, estes apresentavam baixa sensibilidade.

No decorrer dos anos 90 surgem os primeiros conceitos sobre SHM devido ao desenvolvimento dos métodos, dos dispositivos, da integração desses dispositivos com sistemas de processamento de dados recolhidos e devido ao avanço progressivo na análise numérica (modelos numéricos) que modificaram drasticamente a prática da avaliação estrutural (Farrar and Worden 2007).

Uma visão geral sobre os parâmetros modais utilizados na deteção, na identificação, na caracterização e monitorização estrutural de danos foi apresentado na revisão da literatura em 1996 (Doebbling, et al. 1996). Apresentaram ainda resultados experimentais de SHM baseada na mudança de parâmetros modais na deteção de danos. Com isto, os autores perceberam a necessidade de desenvolver métodos que considerem danos não-lineares e ainda estudos que refletissem sobre a quantidade de sensores e a sua localização de forma a tornar o projeto de sistema SHM mais preciso na deteção de danos. Terminou destacando a necessidade de desenvolver mais estudos que comparassem os diferentes métodos de avaliação estrutural e a implementação dos sistemas de SHM em campo (Doebbling, et al. 1996)

Na viragem do milénio, a implementação de sistemas e sensores baseada na tecnologia ótica teve enorme destaque na monitorização pois, apresentavam vantagens bastante atrativas quando comparados com métodos mais convencionais (Antunes, et al. 2015; Antunes, et al. 2012b). Vantagens como: medir um vasto número de parâmetros; não haver interferência eletromagnética; funcionar sob o efeito de altas temperaturas; não precisar de corrente elétrica no ponto de medição; peso e dimensões reduzidas e reduzidos custos de implementação e manutenção fazem da tecnologia ótica umas das mais promissoras no contexto da monitorização (Antunes, et al. 2012a; Wu, et al. 2010).

Com os sucessivos avanços nos sistemas de monitorização houve uma necessidade de uniformizar os métodos, tentando criar um método padrão que servisse de orientação para uma eficiente monitorização. Zhou et al. (Zhou, et al. 2013) apresentou um "guia de boas práticas" e diretrizes para padronizar os métodos de teste.

Uma das principais diretrizes no campo de SHM de estruturas de engenharia civil foi publicada, em 2001 pela ISIS Canadá - A Rede Canadiense de Centros de Excelência em Sensores Inteligentes para Estruturas Inovadoras (Mufti 2002). Dentro desta rede de universidades e institutos de pesquisa, há vários anos, pesquisas têm sido conduzidas para desenvolver técnicas de forma a facilitar a monitorização. Além disso, a durabilidade e a fiabilidade dos sistemas SHM foram demonstrados durante 5 anos em projetos de demonstração, localizados em todo o Canadá (Czichos 2013; Tennyson, et al. 2001).

Posteriormente, a SAMCO (Structural Assessment, Monitoring and Control) publicaram em 2006 outra diretriz com o objetivo de introduzir procedimentos existentes e tecnologias para SHM e dar recomendações para sua aplicação (Mesquita, et al. 2016).

Mais recentemente, em 2013 foi apresentado por Daum et al. (Daum 2013) a Diretriz para a Monitorização Estrutural, onde enfatizam a implementação de sistemas SHM.

Os avanços nos procedimentos de identificação dinâmica e a otimização do desempenho de hardwares tem um papel relevante no desenvolvimento de SHM. Neste contexto, na análise em grande escala, fora desenvolvido formas de minimização dos efeitos ambientais nos dados recolhidos, recorrendo as técnicas de análise modal operacional (OMA) (Lorenzoni 2013; Martins, et al. 2014; Rainieri, et al. 2009).

3.3. PROJETO DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

Para realizar e conceber um projeto de monitorização eficiente e adequado, de forma a obter resultados confiáveis e com a exatidão apropriada ao caso, são necessários alguns requisitos importantes que auxiliem a sua implementação e a obtenção de um sistema de monitorização completa.

O primeiro requisito passa pela definição clara dos objetivos da monitorização, tornando-se mais fácil determinar: o tempo de aplicação; as grandezas a medir; a amplitude de valores, isto é, valores mínimo e máximo a medir. Posteriormente é possível escolher o sensor mais indicado tendo em conta a durabilidade, a tecnologia disponível, a precisão necessária e a as condições do local de aplicação.

Sistemas de Monitorização

Em primeiro lugar é importante distinguir a diferença entre monitorização e sistema de monitorização. A monitorização é o processo de avaliação que envolve a análise do conjunto de dados monitorizados, isto é, os parâmetros estruturais, enquanto que, sistema de monitorização pode ser visto como o conjunto dos meios físicos usados para o processo da monitorização. Concluindo, monitorização é o processo e sistemas de monitorização são os meios físicos do processo (Rego 2016).

O sistema de monitorização permite detetar danos, mas também quantificar e avaliar as alterações na capacidade resistente e desempenho da estrutura, através de um conjunto de sensores que compõem o sistema de monitorização. Em geral, contêm três componentes principais: a própria unidade de deteção (sensor), comunicações e computação (hardware e, conforme o caso, algoritmos de controle e processamento de software) (Ko and Ni 2005).

O objetivo de qualquer sistema de rede de sensores SHM, isto é, um conjunto de sensores interligados, é fazer com que a leitura do sensor esteja diretamente correlacionada e o mais eficaz possível ao dano ocorrido.

Os sensores, através de um sistema de aquisição de dados, fazem uma leitura das alterações paramétricas captadas e transforma essa informação, organizando-a de acordo como foi programado. De seguida, os dados são submetidos a um tratamento e análise para uma posterior tomada de decisão, onde depois seguem para um banco de dados que servirá para uma retroalimentação. Deste modo, é possível melhorar o tratamento dos referidos dados. A Fig. 3.1 ilustra o fluxograma típico de um sistema de monitorização.

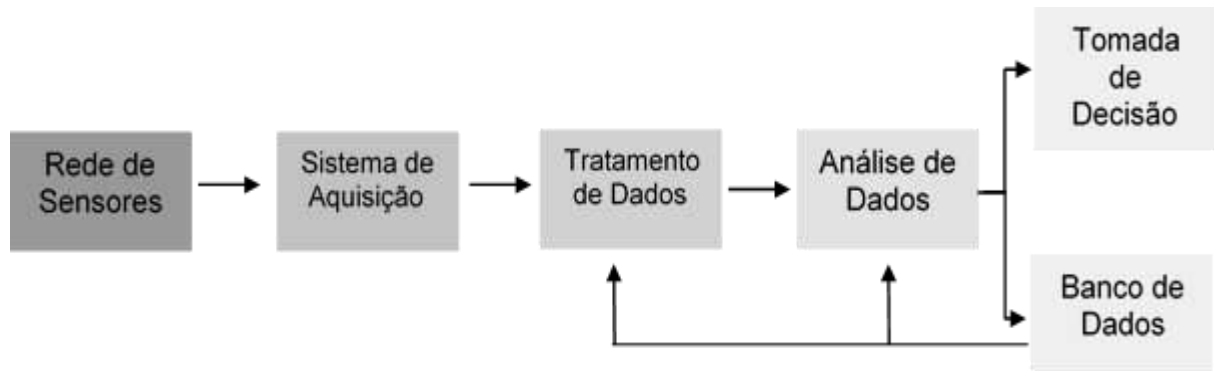


Fig 3.1 - Fluxograma de Informação de Monitorização (Adaptado (Rego 2016))

Por fim, é importante relembrar que a equipa técnica deve refletir cuidadosamente sobre o tipo ou nível de resposta requerida ao sistema de monitorização, pois o tipo de ensaio e as demais etapas envolvidas na implementação da monitorização serão definidos de acordo com o nível de resposta.

Classificação do Nível de Monitorização

Para uma correta implementação de um sistema de monitorização é importante definir o objetivo da monitorização como já foi referido acima. Em grande parte dos casos, o objetivo da monitorização está diretamente ligado às ações a que a estrutura está sujeita, pois, qualquer estrutura está sujeita à degradação dos materiais, devido a fatores ambientais, acidentais e devido ao uso pelos utentes. Deste modo é imprescindível definir quais os agentes mais relevantes na degradação da estrutura, para perceber que dados surgirão devido aos vários agentes de degradação. Só assim é possível, posteriormente, definir o nível de resposta do sistema de monitorização, de acordo com as necessidades requeridas pelos técnicos ou utilizadores, efetuada em conformidade com os níveis assinalados na Tabela 3.1.

Tabela 3-1 Nível de monitorização (Bisby and Briglio 2004)

Nível	Descrição
Nível 1	A monitorização pode detetar danos numa estrutura, no entanto, não consegue indicar informação sobre a localização e gravidade do dano.

Nível 2	A monitorização permite detetar, localizar e acompanhar a evolução do dano, mas não consegue indicar o impacto que ele tem na estrutura ao nível do seu comportamento.
Nível 3	A monitorização consegue detetar, localizar e acompanhar a evolução do dano e pode fornecer alguma indicação do impacto da gravidade do dano.
Nível 4	A monitorização é capaz de detetar danos e informar detalhadamente sobre a sua localização, evolução, gravidade do impacto e ainda consegue usar esta informação para avaliar a segurança do sistema estrutural.

A definição do nível de diagnóstico é de grande importância, principalmente aquando da escolha dos sensores a serem utilizados na monitorização.

Em alguns casos de diagnóstico, a inspeção visual poderá ser suficiente caso exista um conhecimento detalhado do funcionamento da estrutura e das suas componentes. Por outro lado, esta realidade poderá não ser verdade em edifícios históricos pois, o nível de incerteza quanto ao comportamento e composição dos elementos estruturais neste género de edificado é bastante elevado. Sendo assim, é necessário adotar um sistema de monitorização capaz de adquirir o máximo de informação sobre a estrutura. Com tudo, se o funcionamento estrutural for conhecido, é possível instalar um sistema de monitorização simples, tendo em conta os pontos de ocorrência eminente de danos.

Ensaios de Campo

Para a aquisição de dados em atividades relacionadas com a monitorização estrutural, os ensaios geralmente aplicados são classificados de acordo com o intervalo de tempo em que a aquisição de dados é processada. De acordo com (Bisby and Briglio 2004) podem ser classificados da seguinte forma:

- **Ensaios de campo Estáticos:** propriedades inferidas a partir das tensões e das deformações.
- **Ensaios de campo Dinâmicos:** propriedades obtidas a partir da resposta “dinâmica”.
- **Monitorização periódica:** consiste em campanhas de ensaios que se repetem pontualmente com um determinado espaçamento temporal, com o objetivo de se determinar a evolução do comportamento estrutural.
- **Monitorização contínua:** resulta da observação sem limitação temporal de uma estrutura, apresentando como duas modalidades, a monitorização passiva e ativa, em que a monitorização passiva verifica-se quando se elege um processo de monitorização, no qual apenas se verificam os dados dos sensores; a monitorização ativa acontece quando, pela análise dos dados recolhidos, o processo de monitorização tem a capacidade de interagir ou excitar a estrutura.

Componentes Típicos da Monitorização

Como já foi referido anteriormente, a monitorização estrutural pode ser contínua ou periódica onde é usado um sistema de monitorização. Os sistemas de monitorização podem ser aplicados a qualquer tipo de estrutura de engenharia civil como pontes, túneis, plataformas, estradas, edifícios entre outros.

Embora os detalhes específicos dos sistemas de monitorização possam variar substancialmente de caso para caso, um sistema de monitorização contemporâneo normalmente é constituído por seis componentes comuns (Bisby and Briglio 2004).

1. **Sensores e Sistema de aquisição de dados** (Inclui os sensores e sistema de aquisição que recolhem os dados da monitorização);
2. **Comunicação de informações** (Transmissão dos dados para o local de armazenamento e análise);
3. **Processamento e análise dos dados** (Filtragem para remoção de ruído e processamento de dados);

Armazenamento de dados processados (Armazenamento dos dados)

Diagnóstico (Conversão dos dados em resposta estrutural apoiada em algoritmos de deteção e modelação de danos);

A Fig.3.2 mostra um fluxo de informação típico entre as seis componentes de um sistema de monitorização; no entanto, é de salientar que outros padrões de fluxo são possíveis entre as várias componentes do sistema podendo ter mais do que um caminho.

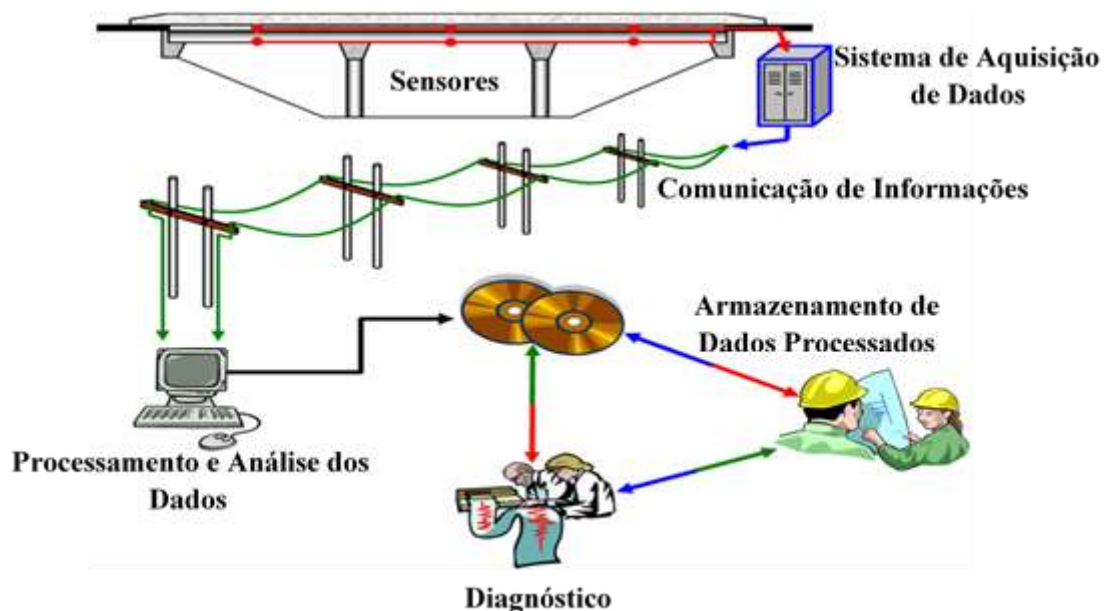


Fig 3.2 - Esquema típico do fluxo de informação das componentes da monitorização (adaptado de ISIS 2004)

1. Sensores e Parâmetros Medidos

Os sensores são peça chave na monitorização estrutural pois, além de serem o instrumento que está em contacto com a estrutura, são responsáveis pela medição dos parâmetros físico-mecânicos (sendo o deslocamento, a rotação, a deformação e a aceleração os parâmetros mais requisitados) previamente pensados e definidos. Na sua definição/escolha é importante relembrar que devem ser bem definidos os parâmetros a medir, o intervalo de medição (valor máximo e mínimo registado), a precisão desejada, a estabilidade das medições efetuadas e as condições ambientais em que a monitorização estará sujeita. Só assim, após as variáveis estarem bem definidas é possível escolher o melhor sensor para cada situação.

A monitorização estática permite medir grandezas de variação lenta, isto é, não necessitam de uma frequência de aquisição elevada, sendo importantes para o conhecimento e análise do comportamento da estrutura. Este tipo de monitorização é realizado usando sensores previamente definidos para cada caso, pois a monitorização estática pode ser dividida em diversas vertentes, das quais: a estrutural, a física e a geotécnica. A diferença entre estas vertentes está no elemento monitorizado. Por exemplo, enquanto a monitorização estrutural observa a própria estrutura, a monitorização geotécnica faz a monitorização dos solos ou rochas, da envolvente. Em algumas situações é necessário monitorizar a interação solo-estrutura e nesses casos são instalados sensores para as duas vertentes, tanto a estrutural como a geotécnica. Nestas situações, os parâmetros medidos tornam o sistema de monitorização bastante mais completo, tornando a caracterização do conjunto estrutura/solo mais eficiente (Marques 2008).

Quanto à monitorização dinâmica, esta permite caracterizar a resposta dinâmica da estrutura, conseguida através da quantificação das vibrações, obtida pela medição das acelerações, velocidades ou deslocamentos a que a estrutura está sujeita. A monitorização dinâmica é de extra utilidade no apoio a modelos numéricos (Marques 2008).

Existem diversos sensores capazes de medir estes parâmetros. Os sensores mais comuns são os elétricos e os óticos; no entanto, ainda existem os mecânicos que estão a cair em desuso.

Quanto ao funcionamento, os sensores mecânicos baseiam-se na leitura presencial do seu registo, fazendo com que não necessite de um sistema de aquisição. Os sensores elétricos, funcionam à base de transmissões de sinais elétricos traduzindo as alterações na intensidade da corrente ou na variação de diferença de potencial. Por fim, o funcionamento dos sensores óticos é baseado na fibra ótica que recorre à transmissão de sinais de luz para registar as alterações nos parâmetros medidos (Tennyson, et al. 2001).

Assim sendo, e devido à diversidade de sensores existentes, a Tabela 3-2 apresenta de uma forma sucinta e simplificada a relação dos parâmetros com os sensores e ainda uma breve descrição do funcionamento de cada sensor.

Tabela 3-2 Exemplos de tipos de sensores adaptado

Parâmetro a medir	Tipo de sensor	Características
Deslocamento / Deformações	Medidor de distâncias a Laser	É um sensor que mede por laser a distância entre dois pontos, no entanto é uma tecnologia com pouca utilização.

	Fibra ótica	São sensores que recorrem à modulação da luz e à sua variação para monitorizar e medir deslocamentos ou extensão, a temperatura, as forças atuantes, entre outros parâmetros. Tem como principais vantagens a imunidade aos campos eletromagnéticos, a possível utilização a grandes distâncias com reduzida perda de sinal, as pequenas dimensões, o isolamento elétrico e a possibilidade de multiplexar vários sensores numa única fibra ótica (Marques 2008).
	LVDT – Linear Variable Differential Transformer	É um transdutor indutivo, onde o seu funcionamento se baseia num núcleo móvel que faz variar o campo magnético entre três bobinas, ou seja, o núcleo ao ser excitado proporciona a interação do campo magnético produzido pela bobina principal e pelas bobinas secundárias. No entanto são sensores de elevado custo económico e necessitam de um amplificador de sinal (Marques 2008).
	Fissurómetros mecânico	É um transdutor de deslocamento, que consiste em réguas graduadas, efetuadas em acrílico ou em PVC que deslizam entre si em uma ou duas direções, permitindo o registo de qualquer movimento. É necessário a visita ao local da sua colocação para realizar leituras e consequentemente é um sensor de baixo custo (Bisby and Briglio 2004).
	LPDT – Linear Potentiometric Displacement Transducer	É um transdutor de deslocamento resistivo, onde se estabelece uma relação entre o deslocamento imposto e a resistência do elemento do sensor, que correlaciona a variação de deslocamento com a variação de potencial ou de intensidade da corrente elétrica. Apresenta uma resolução e o preço muito satisfatório e na generalidade estes sensores não necessitam de um amplificador de sinal, tornando mais competitivo (Félix 2012).
	DWT – Draw Wire Transducer	Também é um transdutor resistivo, que estabelece a mesma relação e funcionalidade do LPDT. No entanto é um determinado tipo de sensor que apresenta uma amplitude de medição superior aos LPDT. Por sua vez, possui um erro associado considerado elevado, logo é menos frequente a sua utilização (Bisby and Briglio 2004).
	Extensómetro de corda vibrante	É um extensómetro resistivo com o princípio baseado na variação da resistência, sendo o transdutor de corda vibrante mais comum. O seu funcionamento apoia-se na relação entre a vibração de uma corda e a tensão a que está sujeita, provocando a emissão de sinais com diferente frequência, que são captados pelo equipamento de leitura (Félix 2012).
Aceleração	Acelerómetros uniaxial	Consiste num instrumento que possui um grau de liberdade relativo em relação ao seu próprio eixo, ao qual se encontra ligado por um mecanismo. A esta, liga-se o objeto a estudar e quando este sofre uma aceleração, o peso, por efeito da inércia,

		tende a conservar a sua velocidade, deslocando-se em relação ao eixo. A magnitude deste deslocamento dá uma medida da aceleração. (Félix 2012).
	Acelerómetros triaxiais	Os sensores triaxiais apesar de serem menos usados em igrejas também são utilizadas com alguma frequência. A sua localização predominante são elementos que vencem vãos, realçando-se principalmente em cúpulas que, por vezes, nesses elementos não é fácil definir uma direção “fraca” (Félix 2012).
	Acelerómetro piezoelétrico	Este é o acelerómetro mais comum, constituído por uma massa inercial e uma base piezoelétrica. O seu funcionamento tem por base o princípio dos materiais piezoelétricos, que quando sujeitos a uma ação, originam uma tensão elétrica proporcional à aceleração da massa inercial do acelerómetro e á aceleração da superfície onde o sensor se encontra instalado. Tem como vantagem a dispensa de alimentação externa, boa estabilidade e durabilidade (Marques 2008).
	MEMS – Micro electrical mechanical systems	A tecnologia MEMS é das inovações mais recentes na monitorização estrutural. Este tipo de sensor baseia o seu funcionamento em micro sistemas, é uma tecnologia que apresenta grandes vantagens económicas, principalmente em termos de consumo de energia e também a nível de impacto visual pelas pequenas dimensões do sensor. Contudo exibe um fraco desempenho em frequências baixas, assim como alguns problemas de alimentação. Com eles também é possível medir acelerações, no entanto, este tipo de sistema de uma forma geral tem sido apontado como bastante promissor em diversas áreas de aplicação (Marques 2008).
Rotação	Clinómetro	Os clinómetros são a tecnologia mais utilizada para a medição de rotação. O seu funcionamento consiste na utilização de uma cápsula de vidro, tendo no interior um fluido condutivo e um sistema de eléctrodos. Dentro da cápsula existe uma bolha de ar que acompanha a rotação, a sua movimentação faz excitar os eléctrodos relacionando a rotação com a variação de resistência. Normalmente a maioria dos clinómetros mede a rotação em duas direções, ou seja, são bidirecionais (Marques 2008).
	Pêndulo	Antes da divulgação dos clinómetros, o pêndulo era dos mais usados, mas apenas em torres, por conseguinte a sua utilização tem caído cada vez mais em desuso.

É importante relembrar, que o sistema de monitorização baseia-se no princípio de que os sensores foram bem seleccionados e distribuídos na estrutura, pois qualquer erro relacionado com a má escolha ou a má distribuição dos sensores torna a análise do comportamento estrutural mais difícil e menos fiável.

1. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é o instrumento que tem por finalidade receber os sinais enviados pelo sensor, o condicionamento e conversão de sinal e posterior transmissão para a estação base.

Na escolha, do sistema de aquisição de dados, é importante ter em conta o condicionamento de sinal necessário para os sensores aplicados, isto é, os dados recolhidos dos sensores têm que passar por um condicionador de sinal e por uma digitalização do sinal de forma a converter o sinal analógico em sinal digital, como ilustrado na Fig. 3.3. O condicionamento de sinal tem varias aplicações, tais como: a amplificação de sinais de baixo nível, isolamento, filtragem de ruídos e linearização (Lorenzoni 2013)

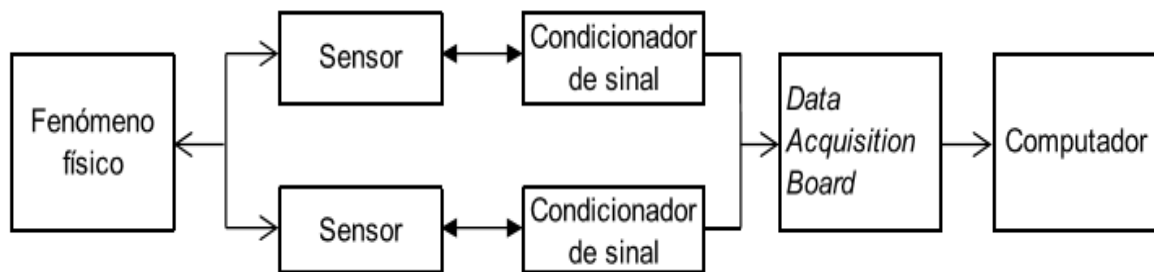


Fig 3.3 - Sistema de aquisição e a sua relação com o sistema de monitorização adaptado (Lorenzoni 2013)

Nos últimos anos tem surgido frequentemente sensores com o condicionador de sinal já integrado, onde o sinal é transmitido depois de pré-tratamento.

Outro ponto relevante no sistema de aquisição é a frequência de aquisição. A frequência de aquisição depende do sensor utilizado. Quando a monitorização é dinâmica há necessidade de recorrer a um sistema de aquisição com frequência de aquisição mais elevada.

Por fim, é importante verificar mais um parâmetro que assume grande importância no sistema de aquisição, a taxa de conversão. A taxa de conversão é a velocidade com que o sistema procede à digitalização dos sinais proveniente dos sensores. Segundo o Teorema de Nyquist, para não ocorrer distorção dos dados, fenómeno conhecido como *aliasing*, a taxa de conversão deverá ser no mínimo duas vezes superior à máxima frequência do sinal a medir (Bergmeister 2003; Marques 2008).

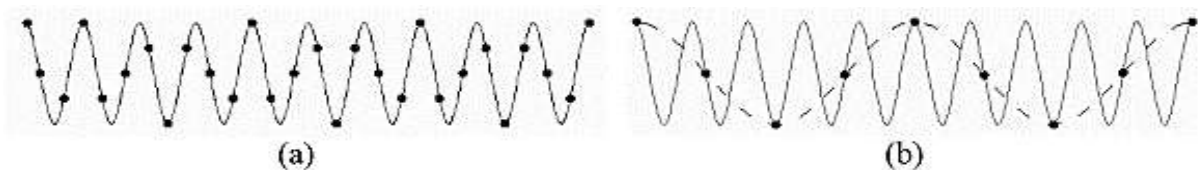


Figura 3.4 - Influência da taxa de conversão de sinal: (a) correta conversão de sinal; (b) incorreta conversão de sinal, com efeito de "aliasing" (Marques 2008)

2. Transmissão de dados

Nos últimos anos, a monitorização tem recorrido a Internet para efetuar a comunicação dos dados com o exterior pois, as vantagens são bastante convidativas, como por exemplo: dispensabilidade/não necessidade de deslocação ao local de instalação e ainda com possibilidade de aceder aos dados recolhidos remotamente fazem deste método o mais eficiente (Abruzzese, et al. 2009).

3. Processamento, análise e armazenamento de dados

O processamento dos dados insere-se no sistema de aquisição, onde através da conversão do sinal fornecido pelos sensores, é possível organizar as informações relativas a estrutura em causa. A visualização de gráficos, barras, marcadores entre outros são apenas algumas das demais formas existentes que tornam essa leitura mais clara e rápida. Um bom processamento de dados deve facilitar a análise de dados e diminuir a ocorrência de um possível mau interpretação.

A análise e armazenamentos dos dados fornecidos pelos sensores é o final do sistema de aquisição, pois trata-se fase onde é concluído sobre a segurança, condição e vida útil da estrutura monitorizada. Posteriormente os dados analisados são armazenados de acordo com o sistema de monitorização num local de fácil acesso (Bisby and Briglio 2004).

3.4. CASO PARTICULAR DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL (EDIFÍCIOS HISTÓRICOS)

No que diz respeito a manutenção e reabilitação dos edifícios históricos, tem-se registado progressos bastante significativos no decorrer dos últimos 10 a 15 anos. A conservação do património torna-se fundamental para a valorização cultural e social das diversas civilizações que usufruem da sua existência. Este princípio assente na manutenção e reabilitação tem forte referência institucional, tais como a Carta de Atenas (1931), Carta de Veneza (1964) e a Carta de Cracóvia (2000).

No âmbito da Carta de Veneza, em 1964 surge uma organização internacional não-governamental de conservação e proteção do património histórico, The International Council on Monuments and Sites- ICOMOS. Esta instituição foca-se na proteger do património, procurando partilhar informação entre membros com o objetivo de definir um modelo comum para a intervenção patrimonial (ICOMOS, 2016).

Segundo aconselha ICOMOS, o nível de conhecimento de um edifício histórico é bastante maior quando é recorrido à monitorização estrutural servindo como apoio e ainda refere que, o diagnóstico deve estar fundamentado em abordagens históricas, tanto quantitativamente como qualitativamente, através da observação direta dos danos estruturais e da degradação do material (ICOMOS, 2013).

Aconselham ainda que, depois de feita uma avaliação da segurança estrutural deve realizar-se uma avaliação de intervenção. Estas avaliação de intervenção pode ser seguida segundo as seguintes recomendações (Vázquez 2005).

- As intervenções não devem ser direcionadas aos seus sintomas, mas sim às causas dos problemas;

- As intervenções na arquitetura do edifício devem causar o menos impacto possível;
- As intervenções devem ser realizadas de forma proporcional aos objetivos de segurança estabelecidos;
- O processo de intervenção deve estar apoiado numa compreensão total das ações que foram a causa dos danos e da degradação do edifício, bem como dos tipos de ações que foram considerados relevantes na análise da estrutura após a intervenção;
- Se o nível de segurança real não puder ser avaliado e aliado ao possível benefício da intervenção, é recomendável a aplicação de um método observativo, através de uma abordagem por incrementos, que terá início por um nível mínimo, com a posterior adoção de possíveis séries de medidas complementares subsequentes;
- A eficiência das intervenções deve ser validada.

As recomendações efetuadas pelas cartas do ICOMOS para a monitorização e posterior intervenção são apresentados segundo um fluxograma para melhor perceção do caminho a percorrer, tal como ilustrado na Fig.3.5.

No processo de identificação de soluções para intervenções em edifícios históricos recorrendo a monitorização estrutural, a intervenção divide-se em 4 fases distintas.

- A fase de investigação;
- a fase de intervenção;
- a fase de avaliação;
- a fase de manutenção.

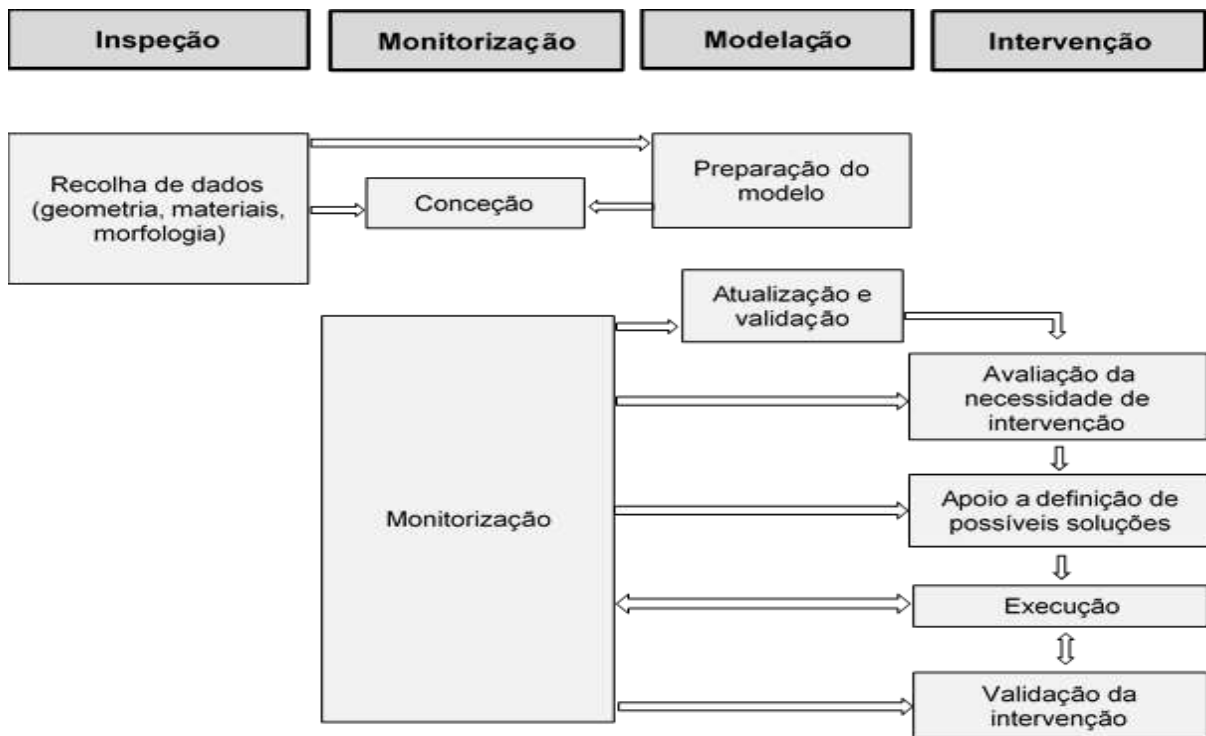


Fig 3.5 - Relação entre a monitorização e a intervenção com os edifícios históricos.

Esta divisão é aplicada nas monitorizações de forma a certificar a sua validação.

Depois do estudo/processo de monitorização efetuado, isto é, deste a definição do estudo até a sua conceção e posterior implementação, é importante ainda salientar as principais linhas de orientação (guide lines) de um sistema de monitorização para edifícios históricos.

Aquando da adoção/escolha de um sistema de monitorização é importante ter em conta o nível selecionado, sendo que na maioria dos casos deve ser optado, um nível de monitorização elevado dada a incerteza associada a este género de edifícios. Também é importante selecionar os sensores mais adequados em conformidade com os dados presentes no local, sendo indispensável a medição de acelerações pois, o grau de dificuldade presente nestas estruturas antigas, associadas à falta de informações e escassez de conhecimento relativamente as características dos materiais da estrutura. No entanto, por vezes torna-se impraticável a medição de acelerações por causa do custo económico associado, nesse caso o sistema deve ser devidamente reavaliado (Marques 2008).

A monitorização nos edifícios históricos desempenha um papel muito importante no sentido em que a intrusão nestes casos é mínima, conservando assim a integridade do monumento, especialmente no sistema de aquisição, pois este é habitualmente o sistema que maior nível de intrusão manifesta. Assim sendo, a solução ideal para tal, deve incidir na escolha de um sistema de aquisição sem fios, tendo em atenção as considerações técnicas dos sensores e do sistema de aquisição (Mesquita 2015).

Em casos particulares tais como, edifícios em elevado risco de colapso eminente é relevante o sistema de monitorização conseguir emitir um alarme capaz de avisar os seus utentes. Quando aos efeitos ambientais, estes devem ser considerados e tidos em conta no trabalho estatístico, principalmente a temperatura, a humidade relativa, a velocidade do vento e a sua direção. Estas considerações são importantes e imprescindíveis pois, estes parâmetros são os que mais condicionam o registo de dados dos sensores utilizados.

É importante ainda referir que na monitorização estrutural de edifícios históricos, como já foi mencionado acima, a escassez de conhecimento do estado dos materiais constituintes e mecânicos da estrutura, impedem a aplicação de um sistema mais correto de monitorização. No entanto, embora este problema exista em grande parte dos casos, por vezes devido a redução dos custos económicos das intervenções associados aos edifícios patrimoniais tornando esta mesma análise menos profunda e integradora dos danos. Deste modo, o processo de monitorização deve refletir a melhor relação entre o custo e a qualidade e funcionar como um apoio para a conservação, reforço e restauro mais cuidadoso e eficiente destes edifícios.

Na conceção de um sistema de monitorização em edifícios históricos, a base de dados é uma ferramenta de enorme importância pois, a análise do edifício será suportada por essa mesma base de dados e quando mais informação tiver maior será o nível de informação disponível, permitindo assim, a aplicação de um sistema de monitorização com uma organização bem estruturada e o mais simples e claro possível.(Mesquita 2015)

A monitorização dos edifícios históricos tem com o objetivo a verificação dos danos existentes e posteriormente analisar o seu estado de conservação e se os danos estão a progredir ou não. Para tal, é necessário conhecer a estrutura significativamente de modo a que os sensores sejam corretamente instalados, isto é, colocá-los nos pontos em que o comportamento da estrutura esteja bem definido. Por outro lado, quando a base de dados e o conhecimento da estrutura é diminuto ou insuficiente é, tendencialmente instalado maior número de sensores que tornará o processo mais dispendioso.

3.5. SENSORES DE FIBRA ÓTICA (SENSORES FBG)

Quanto a capacidade de deteção de danos, os sensores óticos de fibra estão entre as tecnologias mais promissoras, onde um dos principais desafios das técnicas de deteção continua a ser o desenvolvimento de métodos fiáveis para a medição dos principais parâmetros estruturais, mesmo quando a posição de dano não é conhecida com precisão suficiente a-priori. No entanto, na última década, graças aos avanços significativos no campo dos sistemas de sensores de fibra ótica foi possível conceber soluções inovadoras e poderosas, alargando o potencial dos sistemas de monitorização baseados em fibra ótica para a deteção de danos em estruturas bastante complexas, como é o caso de estudo.

Os sensores de fibra ótica podem ser classificados de varias maneiras, podendo ser por exemplo agrupadas em duas categorias principais, sensores extrínsecos ou híbridos e sensores intrínsecos (Ribeiro 1996).

Os sensores extrínsecos ou híbridos são caracterizados por fazer as medições recorrendo a fibra ótica apenas como meio de transporte da radiação até ao local do recetor. Em alguns casos, o sensor externo pode ser baseado em tecnologia eletrónica, sendo a radiação ótica que é transportada pela fibra convertida em energia elétrica que será posteriormente codificada para unidades mais perceptíveis.

Relativamente aos sensores intrínsecos, estes são caracterizados pelas medições ocorrerem diretamente na fibra, isto é, o elemento sensorial é a própria fibra ótica. Esta é uma forma indireta, embora intrínseca de medir uma grandeza física.

Tanto os sensores extrínsecos como os intrínsecos, funcionam através da modulação de uma ou mais propriedades de propagação da onda de luz, tais como a intensidade, comprimento de onda ou frequência, polarização e fase, cada uma das quais potencialmente sensível a determinada grandeza física (Antunes, et al. 2012b; Ribeiro 1996).

A tecnologia explorada está no núcleo da fibra, que não passa de um fino filamento de sílica que transmite luz no seu núcleo. Geralmente a fibra é composta essencialmente pelo núcleo e pelo revestimento, onde este, reflete a luz difusa para o núcleo, garantindo que a transmissão de luz através do núcleo tenha pouco ruído (Antunes 2011; Antunes, et al. 2012a; Ribeiro 1996), tal como ilustrado na Fig 4.18.

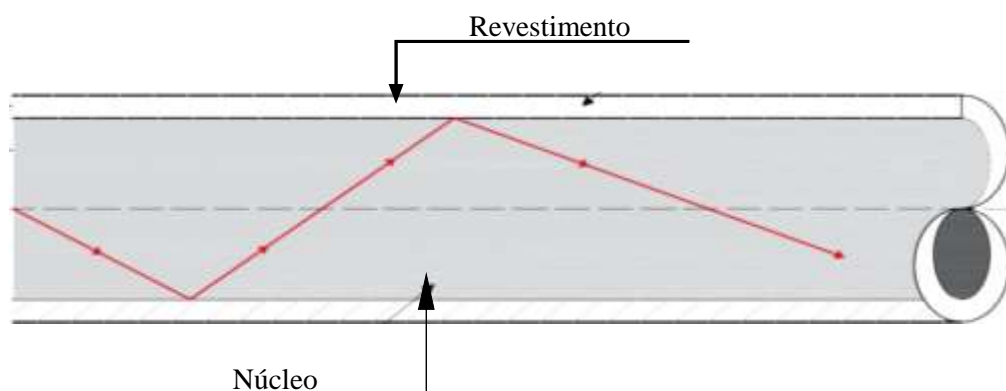


Fig 3.6 - Reflexão de luz em fibra ótica (Barrias, et al. 2016)

No entanto, é importante salientar que por sua vez, cada uma das classes mencionadas das fibras óticas tem várias subclasses, e mesmo em alguns casos, Sub-subclasses que consistem em um grande número

de sensores de fibra. Recorrendo a estudos mais recentes, e tendo em conta os objetivos do presente trabalho, apenas será abordado os sensores FBG, isto é, Faber Bragg Grating. (Antunes 2011; Barrias, et al. 2016; Di Sante 2015).

Os sensores FBG são os grandes impulsionadores dos avanços tecnológicos nos últimos anos na área dos sensores de fibra ótica, sendo hoje alvo de investigações com interesse no seu desenvolvimento. Estes sensores caracterizam-se por possuírem uma rede de Bragg, isto é, uma modulação normalmente periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica. Esta modulação atua como um espelho seletivo do comprimento de onda, onde apenas a luz dentro de uma região espectral muito estreito, com valores típicos da ordem de 10^{-4} a 10^{-2} , centrado no comprimento de onda de Bragg, será refletida. A luz restante continuara o seu percurso pela fibra ótica sem grandes perdas, mantendo a sua capacidade de interrogação para outros sensores que possam existir, outra grande vantagem destes sensores, o multiplexing. A Fig.4.19 ilustra uma esquematização de uma rede de Bragg uniforme inscrita numa fibra ótica, assim como os espectros típicos e da variação do índice de refração. (Antunes 2011; Antunes, et al. 2012a; Barrias, et al. 2016)

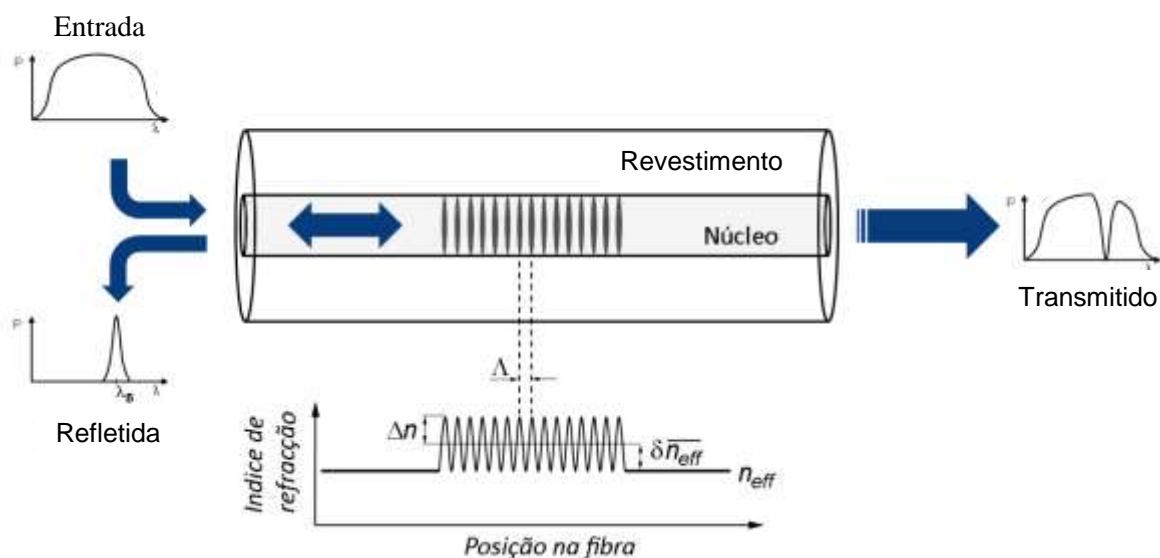


Fig. 3.7 - Esquema do funcionamento de um sensor FBG (adaptado (Antunes 2011) Antunes)

O comprimento de onda do modo refletido, ou comprimento de onda de Bragg, é dado pela condição de Bragg de primeira ordem, dada pela expressão:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff}$$

onde λ_B é o comprimento de onda de Bragg central do sinal refletido, n_{eff} é o índice de refração efetivo da fibra ótica, e Λ o período de modulação do índice de refração no núcleo da fibra ótica. (Antunes 2011; Antunes, et al. 2012a; Di Sante 2015).

Relativamente ao processo de elaboração da rede de Bragg, existem várias técnicas que permitem gravar as redes de Bragg na fibra ótica, no entanto, todos os procedimentos partilham de uma conceção em comum, a exposição do segmento de fibra a um padrão de radiação UV (ultravioleta) de alta intensidade. Mas para tal acontecer, é necessário a fibra apresentar uma fotossensibilidade suficiente para se tornar convenientemente suscetível a radiação exposta. Devido a carência de fotossensibilidade da fibra ótica, torna-se obrigatório adotar técnicas para aumentar a fotossensibilidade da fibra, conseguido através da co-dopagem do núcleo, aumento da concentração de germânio ou hidrogenização da fibra, sendo esta a técnica mais simples e eficaz.(Antunes 2011; Nogueira 2005).

4

CASO DE ESTUDO

4.1. IGREJA DE SÃO LOURENÇO

A igreja de São Lourenço, popularmente conhecida como Igreja dos Grilos, fica localizada na freguesia da Sé, nas imediações do Paço Episcopal da cidade do Porto, que faz parte de um conjunto de edifícios religiosos da cidade conforme ilustra a Fig. 4.1

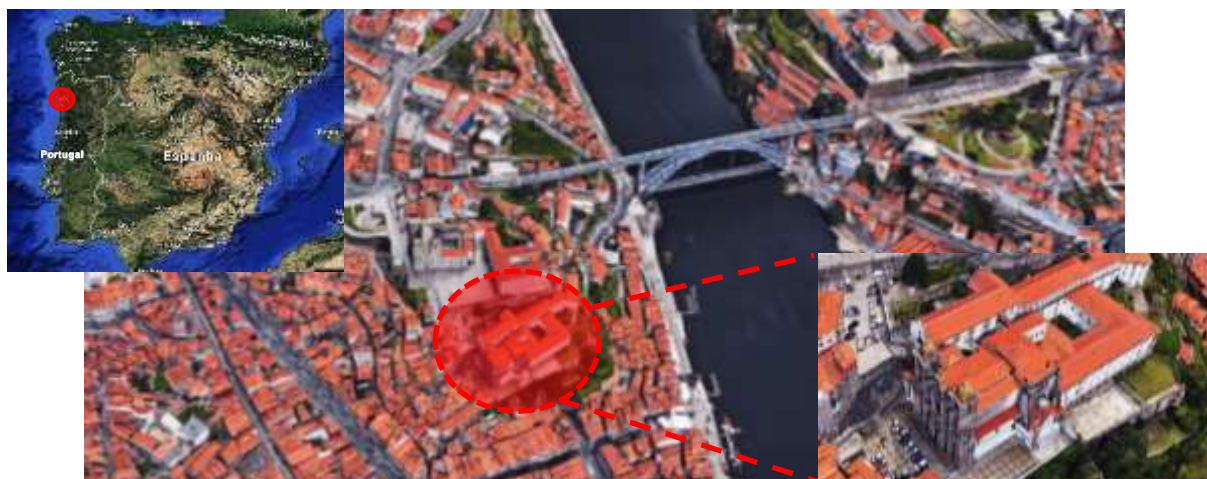


Fig 4.1 - Localização da Igreja de São Lourenço, Porto. Portugal

A igreja de São Lourenço insere-se num conjunto arquitetónico onde foi concebido para funcionar com um Colégio da Companhia de Jesus. De acordo com registos, a primeira pedra foi lançada a 20 de agosto de 1573, dia de São Lourenço, Santo Padroeiro da Igreja. No entanto, só em 1577 é que se dá o início da construção da Igreja, sendo o responsável Baltazar Alvares, onde ficaram instalados os jesuítas até a sua expulsão em 1759.

Desenvolvida ao longo de mais de dois séculos, a construção deste monumento assenta sobre um forte clima erudito de síntese e influencia artística maneirista nórdica, barroco-jesuítica e neoclássico.

A fachada da Igreja de São Lourenço, de grandes dimensões como salientado na Fig. 4.2 (a), engloba 2 níveis e desenvolve-se em cinco panos verticais sendo o pano central saliente destacando a portada principal do edifício, esta constituída por duas colunas assentes em pedestais. Lateralmente existem duas portas de menores dimensões com frontões triangulares que harmonizam a grandiosidade da fachada, criando um espaço cenográfico. A estrutura desenvolve-se na vertical sendo composta por paredes continuas de alvenaria de pedra, com blocos de grandes dimensões e alinhados com juntas regulares. Os blocos de pedra são de granito, característica da região, com a cantaria bem realizada e arrumada, onde há uma notável articulação horizontal perfeitamente comum neste género de edifício, tal como ilustrado na Fig. 4.2 (b).



Fig 4.2 - Igreja de São Lourenço, Porto: a) Fachada frontal da Igreja; b) Maçonaria bem efetuada com articulações horizontais (fachada principal).

Em planta, a igreja tem forma de cruz latina, tal como o esquema ilustrativo da Fig. 4.3 apresenta e faz da Nave Central a sua principal característica, com três capelas em cada lado e ainda o Altar principal (altar-mor) e duas capelas secundárias, a Capela de Nossa senhora da Purificação e a Capela do Santíssimo como ilustrado na Fig. 4.4 (4 e 5). Relativamente ao desenvolvimento da Nave Central, no interior, este apresenta uma abóboda granítica de caixotões e quanto ao transepto, apresenta uma cobertura de berço com marcas jesuítas, como é possível verificar na Fig. 4.4 (2 e 3)

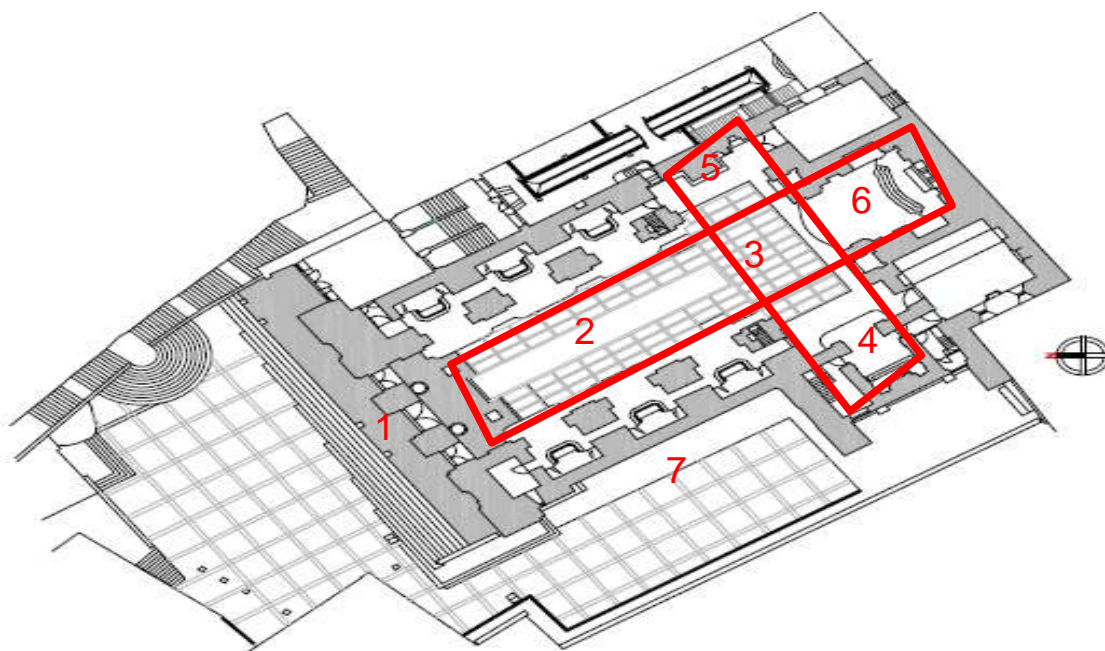


Fig 4.3 - Planta longitudinal em forma de cruz latina da Igreja de São Lourenço

É igualmente interessante referir que ao longo dos anos este monumento já teve várias designações desde Igreja e Colégio de São Lourenço; Igreja e Convento dos Grilos; Colégio de São Lourenço e Seminário Maior de Nossa Senhora da Conceição e Museu de Arte Sacra e Arqueológica. Nos dias que correm, a Igreja é popularmente conhecida como a Igreja dos Grilos e esta denominação deve-se aos Eremitas Descalços de Santo Agostinho vulgarmente conhecidos como Frades-Grilos. Estes foram proprietários entre 1780 e 1832, depois de terem adquirido a Igreja e colégio de São Lourenço à Universidade de Coimbra após a expulsão dos jesuítas de Portugal por parte de Marquês de Pombal.

- 1- Fachada Frontal
- 2- Nave Central
- 3- Cruzeiro (transepto)
- 4- Capela da nossa Senhora da Purificação
- 5- Capela do Santíssimo
- 6- Altar-Mor
- 7- Três capelas de cada lado

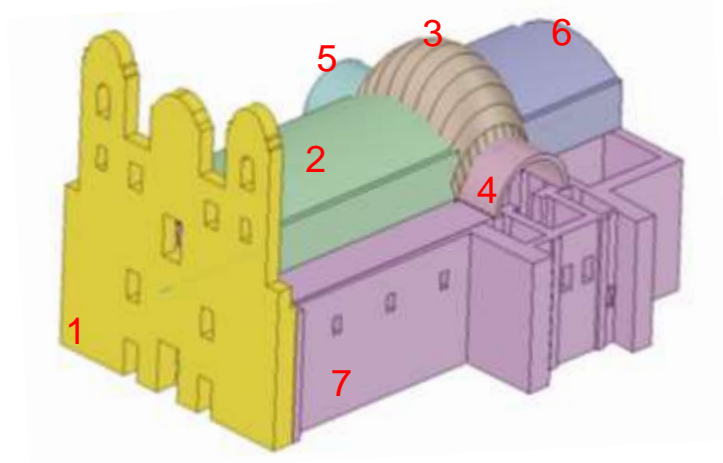


Fig 4.4 - Modelo tridimensional da Igreja de São Lourenço



2 - Nave Central



3 – Cruzeiro ou Cúpula de transepto



4 - Capela da nossa Senhora da Purificação



5 - Capela do Santíssimo



6 - Altar-Mor



7 - Três capelas de cada lado da Igreja

Por fim, a igreja de São Lourenço possui o Órgão Ibérico, umas das peças mais emblemáticas das Igreja. Construída no fim do século XVIII e sendo o seu construtor anonimo, instrumento já foi alvo de intervenção em 1860 e posteriormente na primeira metade do século XX. Por fim, em 1998 após um grande restauro no complexo da Igreja, a Oficina e Escola de Organaria do Mestre organeiro-Pedro Guimarães restaurou o instrumento devolvendo a sua identidade original à peça, como verificamos na Fig.4.5.

Os seus 1500 tubos fazes deste instrumento uma verdadeira obra prima, podendo registar uma variedade bastante ampla de combinações de sons e relativas cores. Mais recentemente, em 2009-2010 o instrumento desempenhou o papel principal no projeto “Sons e Timbre do Órgão Ibérico”, já na sua terceira edição.



Fig 4.5 - Órgão Ibérico da Igreja de São Lourenço (Grilo)

4.2. PRINCIPAIS INTERVENÇÕES CONSTRUTIVAS OCORRIDAS NA IGREJA DE SÃO LOURENÇO

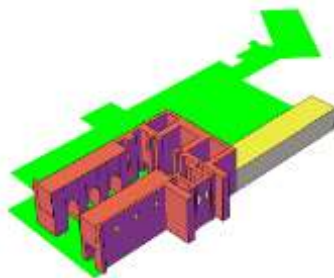
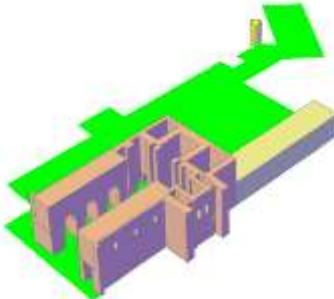
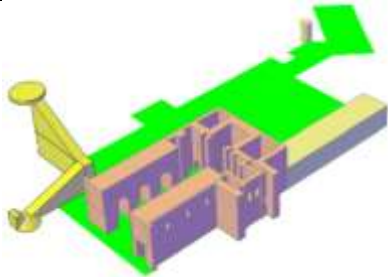
Tal como foi referido acima nos capítulos anteriores, é de extrema importância conhecer a evolução histórica das intervenções para uma melhor interpretação e compreensão dos danos e eventuais mecanismos de rotura das estruturas. Como tal, e com base em pesquisas de (Rego 2016; Rodrigues 2016), é possível apresentar as principais intervenções realizadas no complexo do edifício e as várias etapas realizadas desde o início da sua construção.

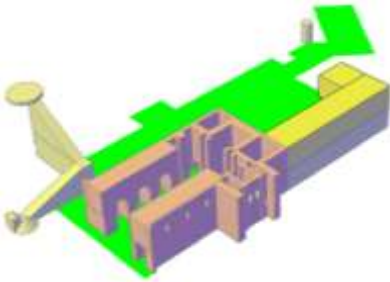
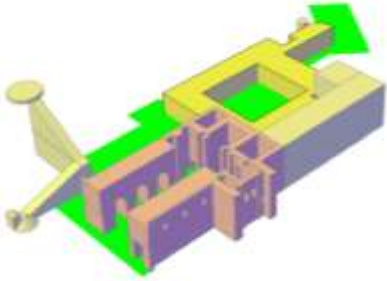
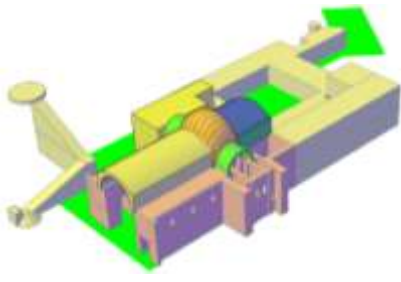
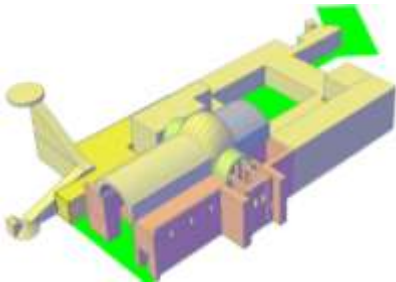
A construção do complexo Igreja e Seminário foi faseada, tendo sido lançada a primeira pedra pelos padres da companhia de Jesus, em 1573.

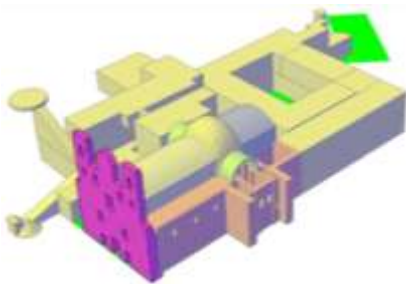
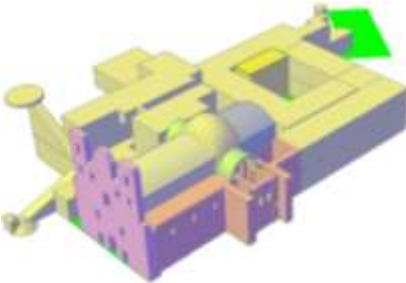
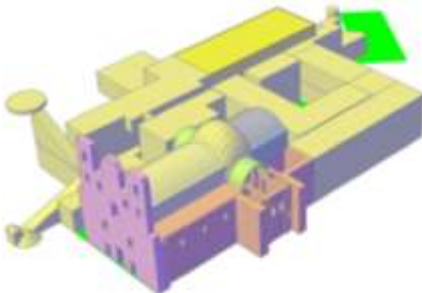
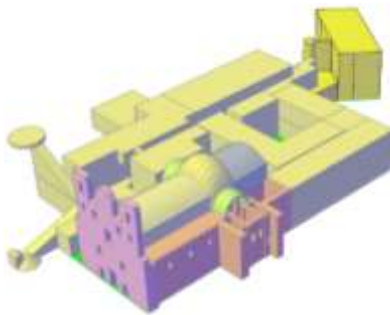
No entanto, em 1575 as obras foram interrompidas devido à forte crise económica sentida na época, muito por causa do endividamento do Colégio e dos gastos exagerados na consolidação dos alicerces do edifício. Tudo havia em 1577, dá-se finalmente o início da construção da igreja dos Grilos.

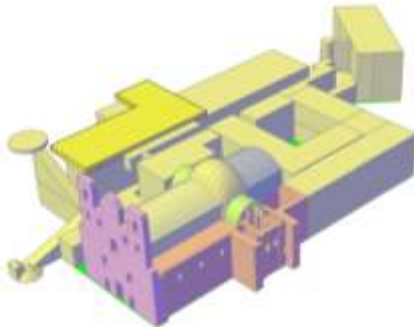
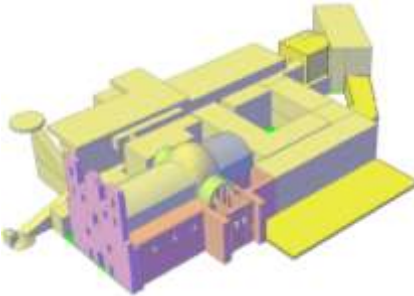
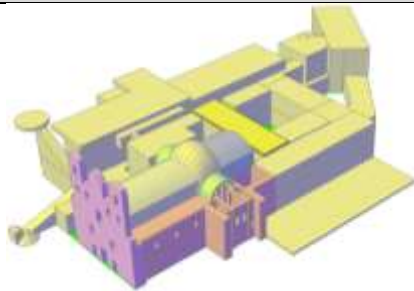
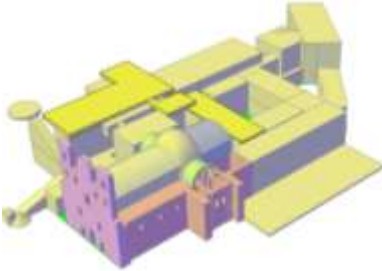
A Tabela 4-1 apresenta de uma forma condensada e clara as fases construtivas mais marcantes do monumento, descrevendo a intervenção que foi efetuada, a data na qual foi realizada e uma ilustração para uma maior precessão da zona em causa.

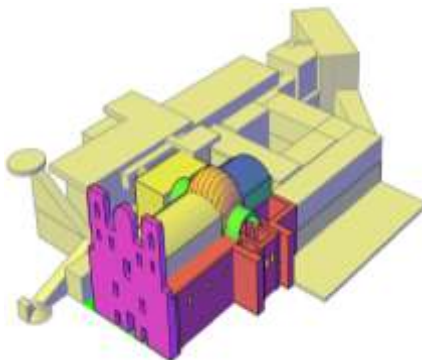
Tabela 4-1 - Principais intervenções ocorridas na Igreja São Lourenço

Ano	Ilustração	Intervenções
1577 - 1579		Início da construção da Igreja / construção dos dormitórios e varanda
1589		Resolução do problema de água com a obra de compra de direito e encanamento da Fonte das Fontainhas que conduzia a água até ao colégio.
1595		Construção das escadas de ligação entre o Largo do Açouge e o Largo do Colégio.

Ano	Ilustração	Intervenções
1603		Conclusão do corpo sul (oito celas).
1613		Conclusão do Corpo Nascente e Interior do quadrilátero. Celas para os padres do 3º ano.
1625		Conclusão do esqueleto da Igreja, cobertura e obras de ornamentação. É também nesta data que as obras de decoração de interiores são iniciadas.
1675		Início da construção da portaria e pátio das confissões

Ano	Ilustração	Intervenções
1709		Conclusão da fachada principal; Construção do coro e colocação das pias de água benta; Abertura das janelas no transepto; Pavimentação da Igreja com translação do cemitério da antiga capela.
1853 - 1854		Obras de armação e telha. Execução de diversas obras no edifício, sem que se tenha conseguido instalar o normal funcionamento do seminário.
1873 - 1876		Aumento de número de quartos, refeitório, cozinha e quartos de banho. Ampliação do coro da Igreja
1879		Colocação de Sacrário na Capela interna. A capela foi aumentada, aproveitando-se um corredor que fica entre a mesma e um quarto mais próximo.

Ano	Ilustração	Intervenções
1906		Construção da biblioteca e algumas salas de aulas, que modificaram a entrada do seminário.
1949		<p>Alteração da ampliação dos finais do séc. XIX, construção de quartos e ginásio;</p> <p>Construção da varanda exterior, ringue e arcadas no exterior do convento com a finalidade de aliviar as cargas sobre o túnel da Ribeira, pelo Engenheiro Teixeira Duarte;</p>
1962		Ampliação e remodelação da capela interior, do refeitório, cozinha e dependência de apoio pelo Arq. Abrunhosa de Brito
1988 - 1989		<p>Obras de Remodelação, realizadas pela DGEMN, onde se inclui:</p> <p>Remodelação da Torre Norte;</p> <p>Beneficiação geral das coberturas</p>

Ano	Ilustração	Intervenções
1990 - 1991		Verificou-se a ocorrência de fendas em algumas paredes da igreja e seminário, marcas visíveis do desnível provocado no assentamento das fundações do edifício e agravado pela construção de túneis sob a escarpa. Um dos pontos mais frágeis do desequilíbrio estrutural foi detetado no acesso à sacristia, verificando-se também fendas nas cornijas, colunas e brechas nos tetos. Apresentação do plano de intervenção para a estabilização do edifício proposto pelo LNEC.

É ainda importante salientar que entre 1994 a 1998 foram efetuadas várias obras de restauro e remodelação do Museu de Arte Sacra sendo o responsável o Arq. Luís Cunha. Estas obras foram levadas a cabo, pois em 1982 a Igreja e Colégio de S. Lourenço foi classificada de património nacional e em 1998, o Centro Histórico do Porto foi classificado como Património Mundial da Humanidade, onde este monumento esta incluído.

Foram realizadas algumas intervenções na reparação das coberturas, onde foram substituídas as estruturas de suporte de madeira por vigas de tijolo cerâmico reforçadas com armaduras e ainda substituídas as telhas partidas, tal como ilustrado na Fig 4.6 e Fig 4.7



Fig 4.7 - Coberturas do Museu Seminário Maior/Igreja de São Lourenço.



Fig 4.6 - Estrutura de suporte das novas coberturas.

Em 2008, no âmbito do estudo realizado para verificação da estabilidade do edifício foram detetados fissuras acentuadas e deterioração da parede junto a escadaria exterior junto á fachada principal da igreja, tendo sido realizado a intervenção de reforço, ver Fig. 4.8.



Fig 4.8 - Restauro da parede exterior junto da escadaria de ligação da catedral à Igreja São Lourenço

Finalmente, em 2010, o Departamento do Património Cultural da Igreja elaborou um documento oficial onde enfatiza a presença de danos estruturais graves e a necessidade urgente de atuação. Estas conclusões foram registadas após uma visita exploratória à Igreja de São Lourenço (Rodrigues 2016).

4.3. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DA IGREJA SÃO LOURENÇO

Relativamente à caracterização estrutural, esta consiste num processo de avaliação de uma estrutura, sendo para isso necessário, a recolha de informação relacionada com o funcionamento estrutural e as propriedades resistentes da estrutura. Com esse objetivo, recorrendo os ensaios estáticos, dinâmicos, ou aplicações mais específicas de caracterização, baseados em métodos não destrutivos, chegamos as seguintes designações (Mesquita 2015).

- Caracterização geométrica;
- Caracterização de danos;
- Caracterização do material.

Caracterização geométrica

A igreja de São Lourenço ou então Igreja dos Grilos foi contruída na sua total maioria em alvenaria de pedra de grandes dimensões assentes em fundações diretas, possuindo uma planta longitudinal também conhecida como planta em cruz latina. A planta de cruz latina caracteriza-se pela particularidade de possuírem uma nave central, um cruzeiro e transeptos.

No decorrer da nave central, a igreja usufrui de três capelas em cada lado da nave, tendo cada uma delas com um espaçamento entre fustes (pilares) de 3 metros. Possui ainda um altar-mor e duas capelas secundárias em cada ponta do transepto, tal como se ilustra na Fig. 4.9

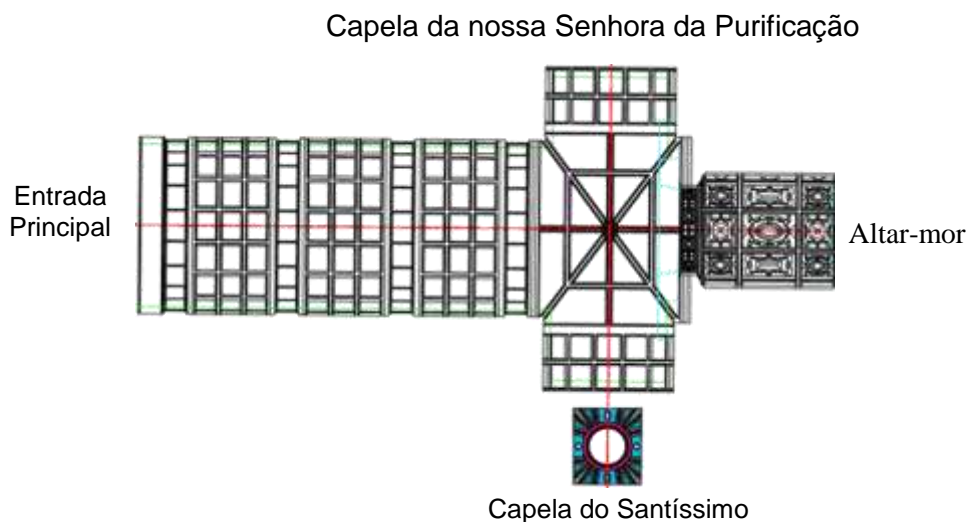


Fig 4.9 - Planta em cruz latina (nave central, crucero e transeptos)

Relativamente às fachadas da Igreja, podemos destacar a fachada principal, sendo a fachada frontal da Igreja e uma segunda fachada, apanhando o lado sul-ocidental da Igreja. A Fig. 4.10 e a Fig. 4.11 representam a fachada frontal e fachada lateral, respetivamente com maior detalhe e maior clareza.



Fig 4.11 - Fachada frontal da Igreja São Lourenço em CAD adaptado de (Rego 2016)

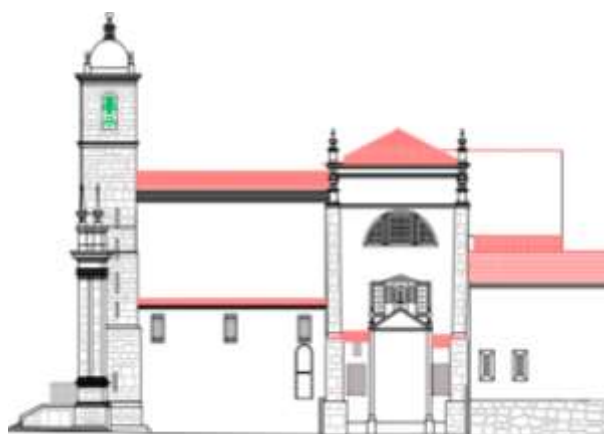


Fig 4.10 - Fachada Lateral da Igreja São Lourenço (fachada sul-ocidental) em CAD adaptado de (Rego 2016)

Caracterização de Danos

No decorrer das obras de restauro e reabilitação do complexo Igreja e Seminário, entre 1994 e 1997 realizou-se também uma investigação importante levado a cabo pelo Laboratório Nacional de

Engenharia Civil (LNEC), para inspecionar toda a estrutura da Igreja. No correr desses anos e com finalidade de avaliar a estrutura foram efetuados vários procedimentos de forma a detetar danos, dos quais destacam-se:

- A instalação de um inclinómetro nas paredes e no contraforte para controlar as rotações;
- Colocação de provetes de gesso nas paredes para controlar o movimento vertical, através de um nivelamento de precisão geométrica;
- Poços de inspeção de abertura perto da parede do lado sul-ocidental da igreja e do seminário com o objetivo de examinar o contacto na área de fundação.

No final da investigação, com os resultados obtidos concluiu-se que a construção do túnel da Ribeira provocou uma descompressão do solo o que levou assentamentos de fundação e deformações da estrutura tal como ilustrado na Fig. 4.12.

Deste modo, foi possível comprovar que o movimento do solo causava rotações da Igreja gerando problemas de instabilidade na estrutura, facilmente detetados pela visualização das fissuras no interior da Igreja. Durante todo esse período de monitorização/investigação a abertura máxima de fissuras registou 0.8 mm como valor máximo. No entanto, as fissuras foram fechadas e não foi alertado qualquer risco na segurança estrutural da Igreja.

Porém, anos mais tarde continuou a verificar-se movimentos estruturais contínuos o que alertou para a necessidade de mais uma intervenção. Em 2015, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) liderou uma investigação que teve como foco a manutenção da segurança estrutural de toda a estrutura. Estes resultados mostraram que o mecanismo formado não envolve apenas o solo da Igreja, mas sim todo o complexo, Igreja e seminário, o que necessitaria de uma intervenção de consolidação e monitorização mais amplo e complexo.

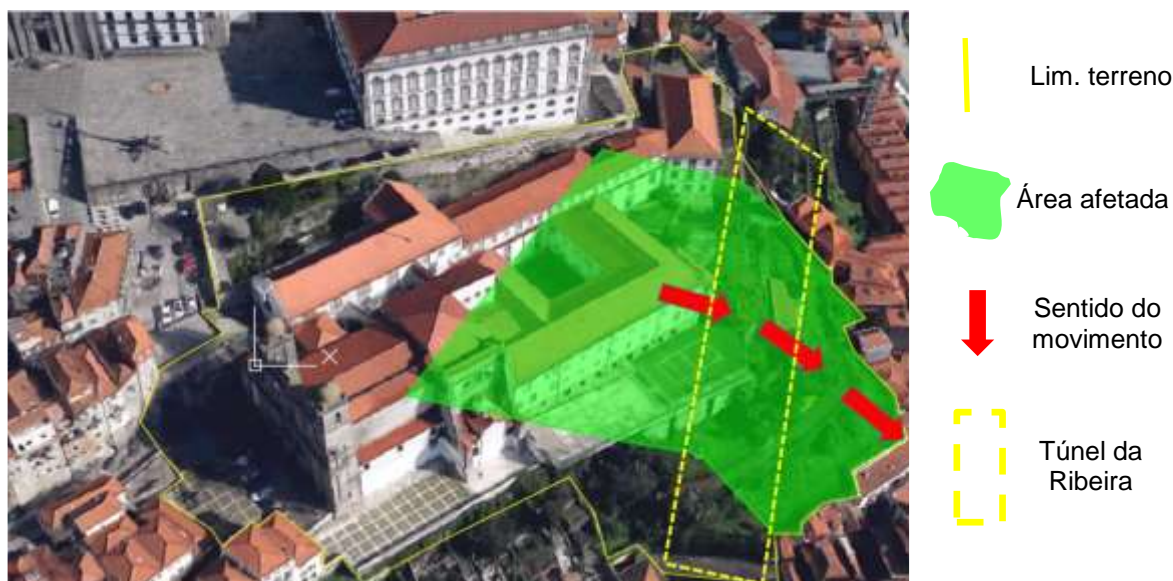


Fig 4.12 - Representação da área em estudo e envolvente (adaptado de (Rego 2016)).

Em novembro do mesmo ano (2015), realizou-se uma inspeção visual à Igreja de São Lourenço onde esteve presente uma equipa constituída por engenheiros e arquitetos ligados à FEUP, onde foram vistoriadas e retiradas fotografias, com foco nos locais onde fissuras foram percebidas, destacando-se os espaços, esquematizados no modelo tridimensional da Fig. 4.13.

- Coro-Alto;
- Nave central;
- Capelas da nave central;
- Abóbada principal;
- Abóbadas laterais;
- Abóbada e capela do Altar-Mor;
- Fachada.

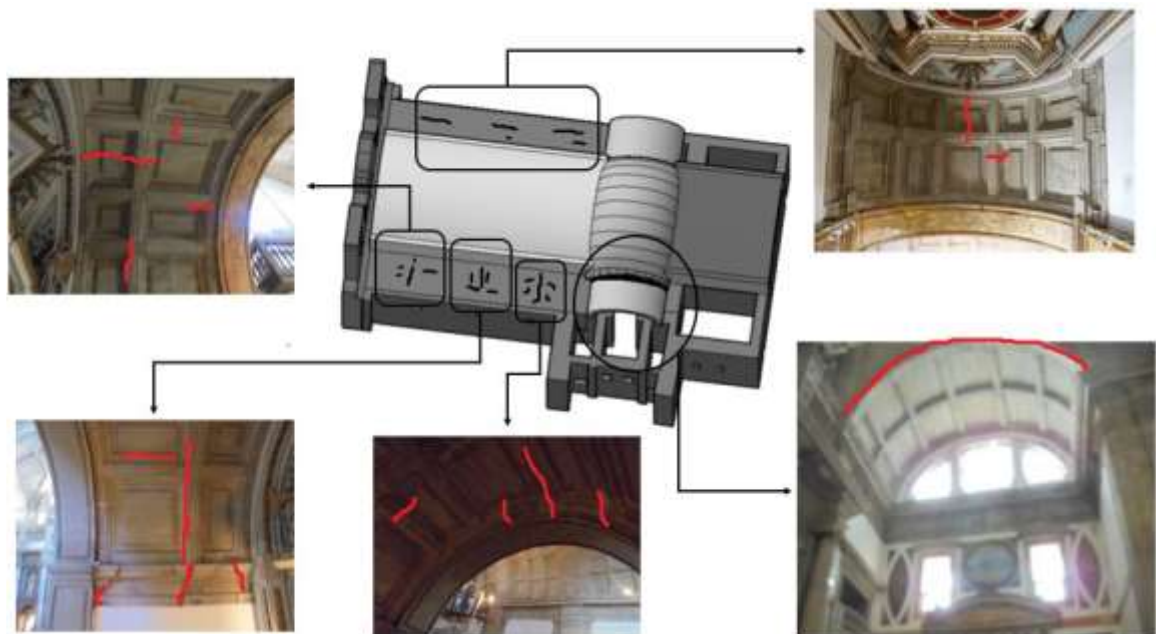


Fig 4.13 - Mapeamento das fissuras principais no interior da igreja(Rego 2016)

No entanto, dada a evidência de que a abóboda da nave central apresentava humidade, procedeu-se a uma inspeção à cobertura da Igreja, onde foi possível observar a existência de infiltrações do teto, determinante para a chegada de humidade até a superfície da abóboda principal. Com isto, e para uma melhor percepção dos danos nos elementos estruturais e da possível degradação das suas características mecânicas, foram realizadas medições com câmaras termográficas para identificar as infiltrações de água e a localização precisa de zonas com presença de humidade.

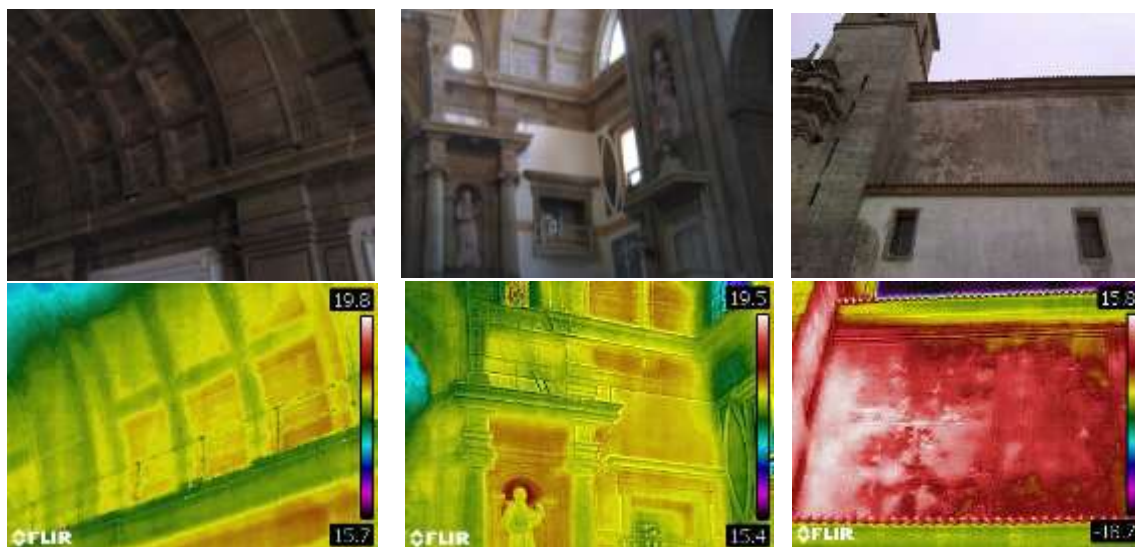


Fig. 4.14 - Imagens retiradas da termografia efetuada na Igreja de S. Lourenço adaptado de (Mesquita.E 2016)

Após a análise dos resultados obtidos, concluiu-se que o desgaste dos materiais não era de origem química, isto é, não era de origem microscópico, mas sim de carácter macroscópico. Facto esse que pôs de lado a hipótese que as infiltrações e humidades seriam os responsáveis pela degradação dos materiais. De seguida, depois de uma nova análise, no entanto mais focadas nas fissuras visualizadas na Igreja de São Lourenço, foram identificados possíveis mecanismos de dano envolvendo movimentos de todo o complexo (Igreja e Seminário) (Mesquita.E 2016).

Em termos gerais, a Igreja de São Lourenço apresenta um bom estado de conservação, especialmente no exterior por não se salientarem as fissuras existentes. No entanto, em termos estruturais devido a forte presença de fissuras no interior, principalmente nas regiões dos arcos das capelas laterais, mais acentuadas no lado direito da Igreja, faz antever, problemas sérios na estabilidade da Igreja, na eventualidade das fissuras continuarem a progredir.

Caracterização do Material

A caracterização dos materiais constituintes em edifícios antigos em alvenaria revela-se bastante desafiante para a Engenharia Civil, pela particularidade das alvenarias serem um material constituído por blocos, juntas e interfaces entre elementos com características mecânicas muito distintas. Consequentemente e devido a extensa variedade de materiais e técnicas usadas no período da construção dos edifícios históricos, a alvenaria torna-se um material de elevada complexidade. Neste sentido, este tipo de edifícios apresenta diferentes níveis de rigor e complexidade, tudo de acordo com a forma geométrica do edifício, do seu comportamento e das características intrínsecas dos materiais usados (Brandão, et al. 2016).

A caracterização dos materiais torna-se num passo bastante importante aquando da modelação numérica pois, é através dos modelos numéricos que é traduzido o comportamento das estruturas, sendo as propriedades mecânicas determinados com algum rigor, através dos ensaios não-destrutivos já mencionados. Assim sendo, parâmetros como o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e ainda o peso específico (γ) tornam-se fulcrais para a determinação da rigidez dos elementos estruturais,

bem como a sua deformabilidade e distribuições de esforços. É importante salientar, que todos os parâmetros referidos são extremamente afetados pelas características de cada um dos elementos constituintes das alvenarias nomeadamente as propriedades físicas e mecânicas das pedras.

No entanto, usufruindo de trabalhos de investigação desenvolvidos sobre o tema é possível alcançar vários valores padrão conseguidos através dos resultados experimentais. Neste sentido, servem como valores de referência na elaboração de uma modelação numérica.

Entre vários trabalhos analisados, destaca-se o trabalho realizado por (de Almeida 2013) pela sua caracterização das propriedades de vários grupos de alvenarias da região do Porto, local onde a Igreja de São Lourenço está inserido. Com isto, optou-se por extrair os valores do módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e do peso específico (γ) deste trabalho conforme é apresentado na Tabela 4-2.

A Tabela 4-2 apresenta valores para dois tipos de paredes, paredes regulares e paredes irregulares, considerando um comportamento linear-elástico dos materiais

Tabela 4-2 Valores considerados dos parâmetros sobre as propriedades mecânicas dos materiais (adaptado (de Almeida 2013)).

	<i>Módulo de Elasticidade (E)</i> <i>kN/mm²</i>	<i>Coefficiente de Poisson (ν)</i>	<i>Peso Específico (γ)</i> <i>kN/m³</i>
<i>Parede Regular</i>	2.0	0.2	25
<i>Paredes Irregulares</i>	1.5	0.2	22

4.4. MODELO NUMÉRICO DA IGREJA SÃO LOURENÇO

A modelação numérica de edifícios antigos em alvenaria tornou-se um desafio para a Engenharia Civil, principalmente devido a complexidade da alvenaria como um material, habitualmente constituído por blocos de pedra ou semelhante, juntas e interfaces entre elementos com características mecânicas muito distintas entre si. Para além da extensa variedade das características dos materiais inerente as alvenarias, é necessário ter em conta as várias técnicas usadas no período de construção do edifício e ao envelhecimento e consequente deterioração dos materiais, o que torna as alvenarias antigas ainda mais complexo. Neste sentido, os métodos de análise utilizados neste género de edifícios apresentam diferentes níveis de rigor e complexidade, tudo em função da forma como as ações atuantes na estrutura são representadas, como a geometria e o comportamento da estrutura é representada e ainda como as características dos materiais são usados no decorrer da modelação (Brandão, et al. 2016).

Com isto, a necessidade de conhecer as propriedades mecânicas dos materiais torna-se imprescindível na modelação numérica, entre os quais, o Módulo de Elasticidade (E), o Coeficiente de Poisson (ν) e o Peso específico (γ) são bastante relevantes, uma vez que a calibração correta do modelo está profundamente dependente destas propriedades.

No entanto, é importante salientar que na execução do modelo numérico, as propriedades mecânicas devem ser determinadas com algum rigor, pois os parâmetros como módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν), permitem caracterizar a rigidez dos elementos estruturais e ainda permitem determinar a deformabilidade e distribuição dos esforços da estrutura. Por ultimo, o parâmetro do peso específico (γ) é indispensável no calculo do peso próprio, sendo determinante na resposta dinâmica da estrutura pois, exerce grande influencia sobre a massa do sistema estrutural.

Por outro lado, os parâmetros descritos acima são extremamente influenciados pelas características de cada uma das componentes constituintes das alvenarias, principalmente as propriedades físicas e mecânicas das pedras usadas. Nesse sentido, e recorrendo a vários trabalhos realizados e desenvolvidos na área, é possível chegar a vários valores alcançados por resultados experimentais permitindo desse modo, obter valores de referencia para a elaboração de modelos numéricos.

Como já foi referido, entre os vários investigadores e respetivos trabalhos na área, destaca-se o trabalhos realizado por (de Almeida 2013) que caracteriza as propriedades de vários grupos de alvenaria da região do Grande Porto, para diferentes tipos de paredes, tais como, paredes regulares e paredes irregulares considerando um comportamento linear-elástico dos materiais. Uma vez que o caso de estudo, a Igreja São Lourenço, localiza-se na área do Porto e graças ao contributo do estudo (de Almeida 2013) é possível obter valores de referencia para o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e peso específico (γ) com algum rigor de modo a usar na modelação numérica. A análise, recorrendo a modelos numéricos, tornou-se num preciso instrumento para o estudo de estruturas históricas.

Com esse foco, foi construído um modelo tridimensional da Igreja, modelada em Autocad®, através de plantas e alçados disponibilizados pelo Colégio de São Lourenço, Seminário Maior de Nossa Senhora da Conceição e Museu de Arte Sacra e Arqueológica. A Fig. 4.15 ilustra a Igreja de São Lourenço modelada em Autocad® 3D, adotando algumas simplificações em determinadas zonas do edifício, de modo a facilitar o estudo da estrutura mas tendo em conta o rigor exigido (Rego 2016).



Fig 4.15 - Modelo em Autocad®3D da Igreja São Lourenço.

De seguida, recorrendo ao programa de simulação ANSYS®, importou-se o modelo tridimensional do Autocad® para o ANSYS® e inseriu-se as características e propriedades geométricas necessárias para realizar as análises da estrutura. Com isso, usando o programa de elementos finitos, ANSYS®, atribuiu-se uma malha de elementos tetraédricos de dez nós para a discretização do modelo numérico, conforme consta na Fig.4.16, constituída por 43527 nós e 23086 elementos (Rego 2016).

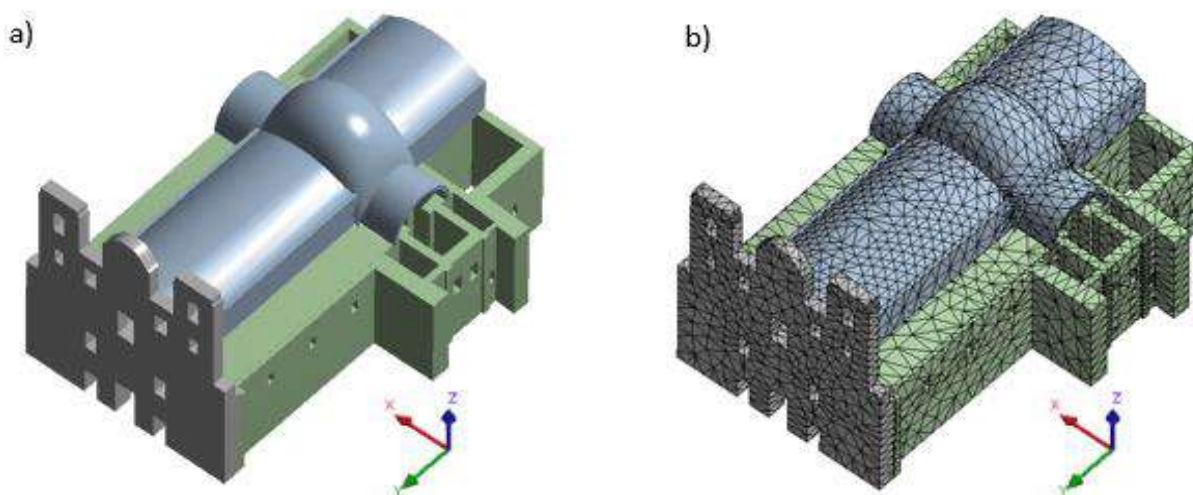


Fig 4.16 - Igreja de São Lourenço: (a) Modelo tridimensional importado no ANSYS; (b) Malha utilizada para a discretização do modelo numérico (Rego 2016).

Tendo em conta o comportamento linear-elástico do material e para a realização da análise numérica, a fachada da Igreja foi separada do corpo do edifício, e o corpo também dividido em duas partes, as paredes da estrutura e os tetos para melhor representar o funcionamento estrutural. Para a caracterização mecânica das propriedades das alvenarias no programa de modelação de elementos finitos, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 4-3, para os três corpos da estrutura na execução da análise numérica.

Tabela 4-3 Características mecânicas do material do modelo (adaptado (Rego 2016))

	$E [kN/mm^2]$	$\gamma [kN/m^3]$	ν
<i>Fachada</i>	2.0	25	0.2
<i>Paredes</i>	1.5	22	0.2
<i>Tetos</i>	1.5	22	0.2

Com as propriedades mecânicas do material definido, procedeu-se a análise numérica da Igreja, onde foi realizada uma **análise estática** e uma **análise dinâmica**.

A análise estática da estrutura resulta na quantificação da magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que manifesta a estrutura, quando a mesma é carregada, neste caso apenas com o peso próprio, sendo ignorado o efeito das forças de inércia.

Os resultados da análise estática da Igreja de São Lourenço, demonstraram que os valores máximos das tensões principais do modelo, ocorrem na ligação dos arcos das capelas laterais e ainda na ligação das abóbodas da nave central com as paredes verticais. Com isto, é possível conhecer as zonas com potencialidade de desenvolver fissuras. No entanto é importante salientar que, o modelo linear usado apresenta inúmeras limitações devido ao comportamento não linear dos materiais constituintes das alvenarias. Assim sendo, realizou-se a análise servindo apenas para identificar as zonas com tendência de concentração de tensões de tração. A Fig. 4.17 apresenta tensões principais máximas de tração acima de 50 kPa.

A: Static Structural al(ANSYS)

Maximum Principal Stress

Unit : Pa

Time :

11/04/2017 16:20

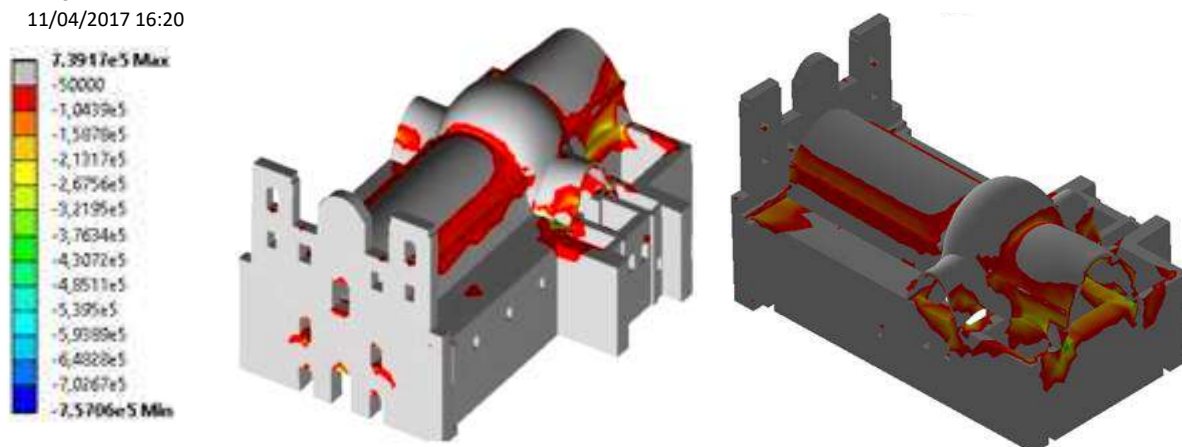
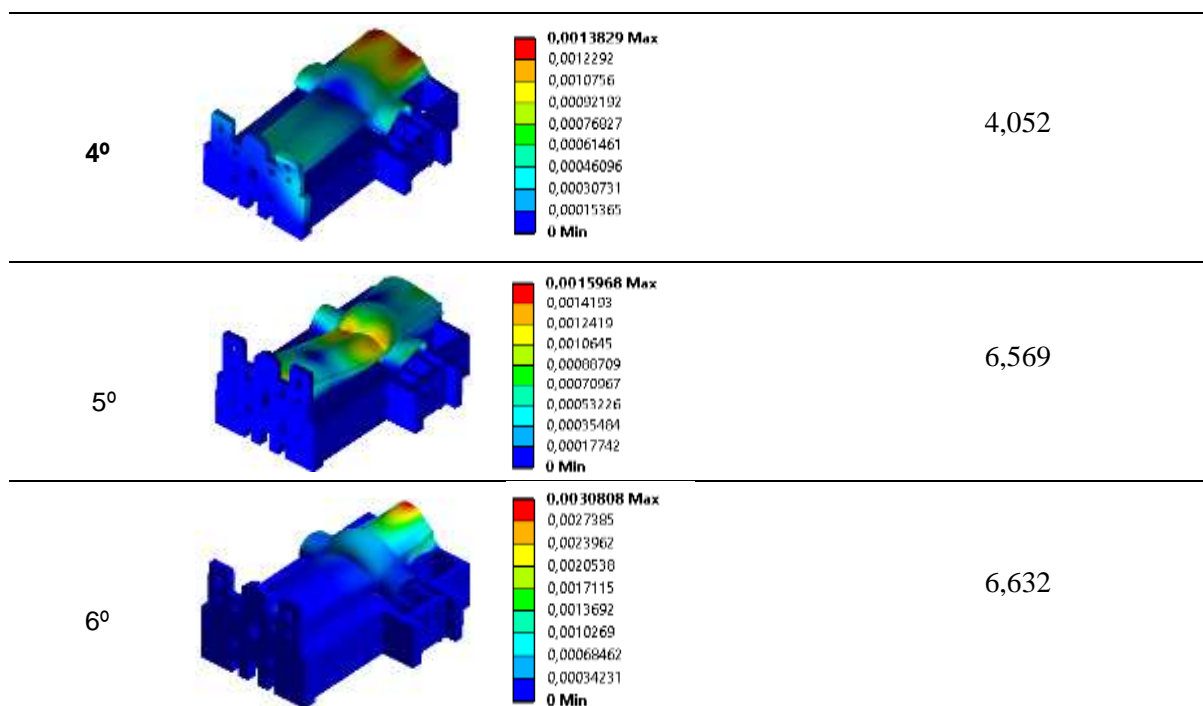


Fig 4.17 - Tensões principais máximas de tração acima 50 kPa.

Relativamente a análise dinâmica, inserindo as mesmas características físico-mecânicos dos materiais e extraiu-se os seis primeiros modos de vibração e as suas respetivas frequências naturais, para fazer a análise global da Igreja São Lourenço. A Tabela 4-4 representa os seis modos de vibração e as respetivas frequências naturais.

Tabela 4-4 Os seis primeiros modos de vibração da estrutura e as respetivas frequências naturais.

Modo de Vibração (m)		Frequência Natural [Hz]
1º		2,661
2º		3,699
3º		3,850



4.5. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Com os avanços sentidos na área da computação, isto é, o desenvolvimento computacional, é possível proporcionar uma ampla divulgação e utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) para os mais diversos problemas de Engenharia. Estes avanços permitem resolver problemas cada vez mais complexos relacionados com efeitos dinâmicos. Para além dos fenómenos referidos é ainda possível simular várias ações com um nível de precisão cada vez mais sofisticado. As ações permanentes, as ações como a circulação de pessoas ou a movimentação de máquinas sobre lajes, as ações do vento sobre edifícios altos, as ações rodoviárias em pontes e a simulação de sismos são alguns aspetos que passaram a ser fundamentais no momento do dimensionamento de estruturas (Brandão, et al. 2016).

O MEF, sucintamente, consiste em usar como parâmetros as variáveis nodais de um número finito de pontos previamente selecionados, o que habitualmente designa-se de nós. Aquando da utilização do MEF, o domínio de integração é dividido numa série de regiões conhecidos como elementos finitos, existindo uma interligação entre si por meio de um número discreto de pontos nodais. Em cada elemento infinitesimal gere-se um comportamento local de tal modo, que as incógnitas do problema podem ser definidas em função dos pontos nodais do elemento. Deste modo, a resultante das somas das contribuições de cada elemento cria um sistema de equações, onde passa a ser possível conhecer os valores das incógnitas nos pontos nodais, consequentemente permite o cálculo de outros resultados intermédios (Fluent 2009).

A divisão da estrutura analisada num número discreto de elementos finitos, sendo que esses elementos se encontram interligados entre si por pontos nodais, gerem uma malha de elementos finitos. A malha de elementos finitos tem como funcionalidade, proceder à assemblagem das comportamentos individuais de cada elemento finito, resultando num comportamento global da estrutura em estudo. A Fig 3.6 representa um exemplo de uma malha de elementos finitos da Igreja São Lourenço.

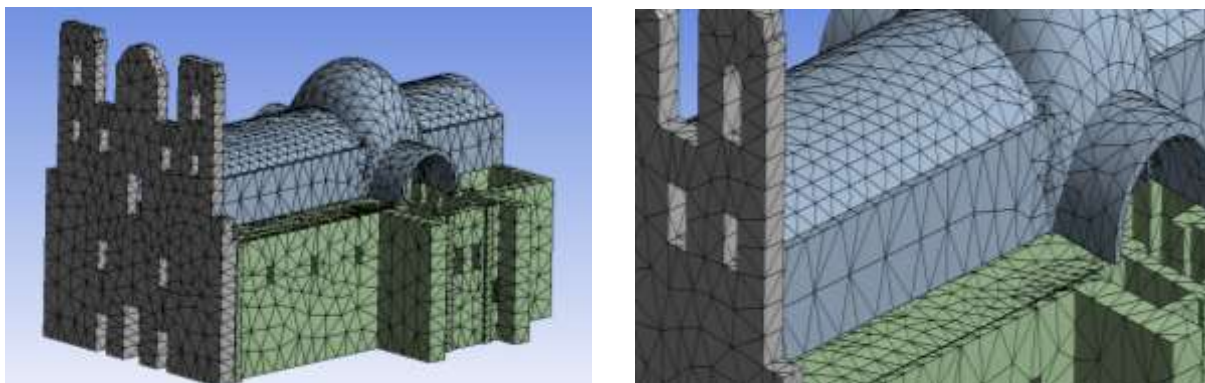


Fig 4.18 - Exemplo de uma malha de elementos finitos da Igreja São Lourenço.

Atualmente o MEF é o método numérico mais usual, sendo usado na sua grande maioria das vezes, por exemplo, para dimensionamento de grandes infraestruturas com particular interesse para a simulação do comportamento de estruturas em situação dinâmica. A sua resolução numérica de sistemas de equações diferenciais parciais, permitem alcançar soluções sobre o estado de tensão e de deformação de qualquer sólido, seja qual for a sua geometria e ainda sujeita a diversas ações (Brandão, et al. 2016).

Estes métodos modernos tornam-se ainda mais importantes quando se trata de edifícios históricos ou com valor patrimonial. Nestas situações, recorre-se a análises mais minuciosas de modo a diagnosticar e efetuar uma avaliação da segurança das estruturas com maior eficiência e certeza.

No entanto, para tal, é necessário desenvolver modelos numéricos de forma a delinear uma estratégia capaz de antecipar o comportamento da estrutura, pois este tipo de estruturas apresenta um grau elevado de complexidade. Nesse sentido, para fazer uma análise em estruturas históricas, deve-se definir uma estratégia de modelação adequada, sendo que a estratégia de modelação deverá ser multidisciplinar, de forma a ir absorvendo todo o contributo adquirido das diferentes áreas de investigação.

Assim sendo, este tipo de estratégia de modelação apresenta uma metodologia que se encontra dividida em duas fases principais, como podemos verificar na Fig 3.7 (Binda, et al. 2000; Rodrigues 2011; Silva, et al. 2010). Sendo a primeira etapa uma fase de conhecimento e a segunda etapa uma fase de análise.

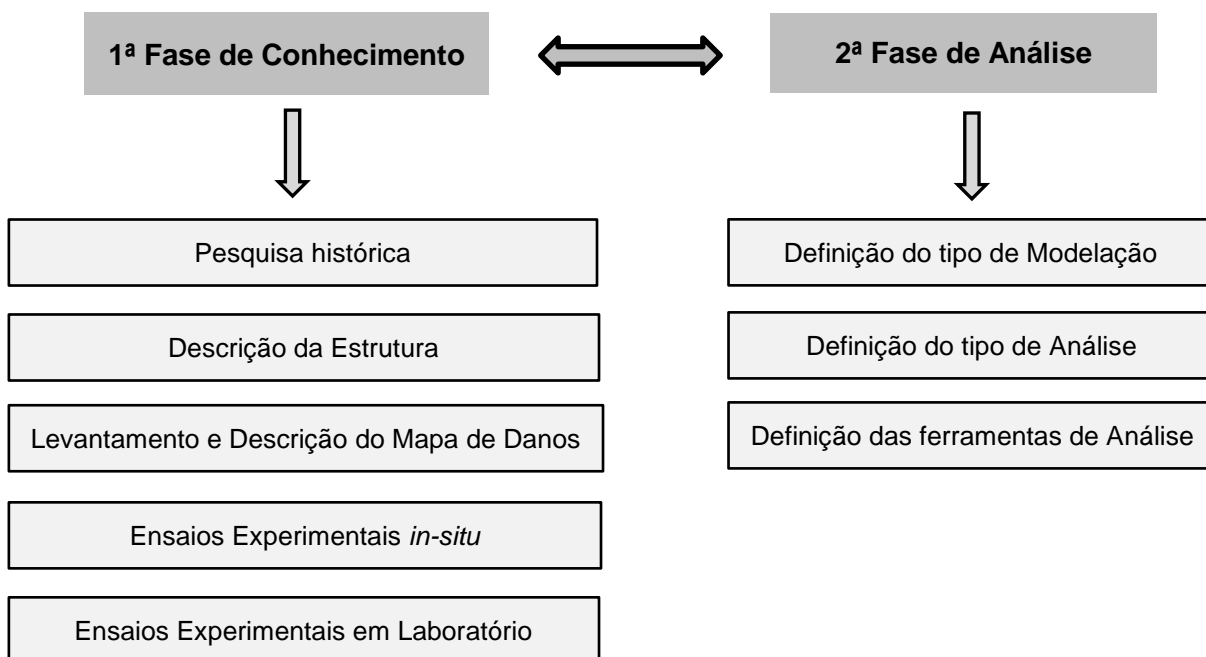


Fig 4.19 - Estratégia de modelação para estruturas históricas adaptado (Silva, et al. 2010)

5

MONITORIZAÇÃO DA IGREJA DE SÃO LOURENÇO

Na altura de decidir sobre uma intervenção numa estrutura de um edifício de carácter histórico, é preponderante ter uma cuidada avaliação da segurança estrutural, identificando o estado de degradação dos materiais, os danos existentes ou um conjunto de alterações que impliquem condições desfavoráveis para a estrutura. Como já referido anteriormente, neste género de estruturas, as intervenções necessitam de uma sensibilidade acrescida para melhor compreensão das mesmas, onde adotando metodologias de análise mais rigorosa e cuidada, vulgarmente de carácter quantitativo, permite a identificação das características dos materiais, da estrutura e ainda caracterizar a origem das patologias existentes.

Neste capítulo propomos-mos a apresentar o plano de monitorização implementada na Igreja de São Lourenço. Serão ainda descritos e analisados o resultado sobre a influência da temperatura nas tensões e deformações do plano de uma parede da estrutura.

5.1. PLANEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS ENSAIOS

As estruturas de alvenaria antiga adequam-se a abordagem metodológica por etapas semelhante a usada na área de medicina, neste caso recorrendo a sensores de fibra ótica para a monitorização (Roque 2002).

- Anamnese (historial): estudo da evolução histórica e recolha de dados e informações importantes;
- Diagnóstico: identificação das causas das anomalias e da degradação e ainda, a avaliação da segurança estrutural;
- Terapia: escolha e aplicação da(s) técnica(s) de intervenção.
- Controlo: acompanhamento e controlo da eficiência da intervenção.

A primeira etapa, resume-se à recolha de informação sobre a história do edifício, recorrendo a pesquisas de documentos e registos históricos e arqueológicos muito frequentes neste género de edifícios. Esta etapa tem como foco encontrar informações sobre as diferentes fases de construção e utilização, tentando ainda saber informação sobre as técnicas construtivas e os materiais usados. É de referir, que em muitos casos e visto tratar-se de edifícios antigos, a informação por vezes é escassa, o que pode dificultar estar fase.

No diagnóstico, fase mais preponderante do estudo, é efetuado um levantamento das características construtivas e os seus materiais, com a auxílio de uma campanha de ensaios (*in-situ* ou laboratório). É ainda efetuado uma avaliação preliminar das condições de segurança a partir de observações diretas do estado dos materiais e dos elementos da estruturais, onde posteriormente é elaborado um mapeamento detalhado dos danos e anomalias visíveis como deformações, fendilhações, deterioração das matérias, deterioração entre elementos estruturais, etc.

Em complementaridade, um estudo analítico para estimar, de modo mais rigoroso o grau de segurança recorrendo a modelos numéricos desempenham um papel crucial, pois permitem a calibração dos modelos e validação dos resultados obtidos. Consequentemente, uma análise mais profunda das informações recolhidas, realizada por uma equipa multidisciplinar se necessário, facilitará a conceção da estrutura original, bem como a compreensão das alterações estruturais efetuadas em antigas intervenções e ainda a identificação das causas das patologias.

Uma vez identificadas as patologias e as suas origens, é necessário tomar decisões relativamente as medidas para as atenuar, sendo assim preciso elaborar um projeto de reabilitação/reforço que passa por vários processos, dos quais destacam-se a escolher as técnicas e os materiais mais adequados a usar e ainda todos os pormenores de intervenção.

É importante salientar, que nem todas as intervenções tem como foco corrigir ou emendar anomalias, há casos de intervenção com objetivo de melhorar o comportamento da estrutural e das fundações para o caso de ocorrência de abalos sísmicos ou ainda para assentamentos diferenciais que possam traduzir em danos nefastos.(Bisby and Briglio 2004).

Seja qual for o caso da intervenção, as técnicas utilizadas não devem basear-se apenas nas condições estruturais, mas sim compreender o contexto mais vasto da conservação de um edifício histórico e toda a sua multidisciplinaridade, desde os aspetos artísticos até aos aspetos culturais, nunca deixando de parte o caráter económico da intervenção e a utilização do edifício pelos utentes(Roque 2002).

5.2. DESCRIÇÃO DO PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA IGREJA DE SÃO LOURENÇO

A Igreja de São Lourenço é uma estrutura do património histórico da cidade do Porto e é do interesse de todos que a sua integridade seja salvaguardada, para que as gerações futuras possam conhecer as entidades responsáveis pela história da nossa cidade. É esta a motivação que leva a cabo, a presente dissertação para uma análise estrutural, com principal objetivo de implementar um plano de monitorização no edifício histórico e posteriormente caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais que o constituem, reportando a influência da temperatura nestas estruturas complexas.

Com esse objetivo e tendo em conta a necessidade de desenvolver ferramentas úteis para a avaliação do património recorrendo a monitorização como apoio, foi efetuado uma análise detalhada de toda a Igreja, isto é, foi realizado um estudo que invocou um levantamento dos dados encontrados na Igreja, bem como na sua envolvente e ainda um estudo pormenorizado da evolução e enquadramento histórico da construção do complexo Igreja e Seminário. Por último, foi realizada uma análise estrutural do edifício através de um modelo numérico, sendo deste modo possível delinear e concretizar um plano final de monitorização. Em forma de esquema sintetizado, a Fig. 5.1 representa os processos realizados para concretizar o plano de monitorização.

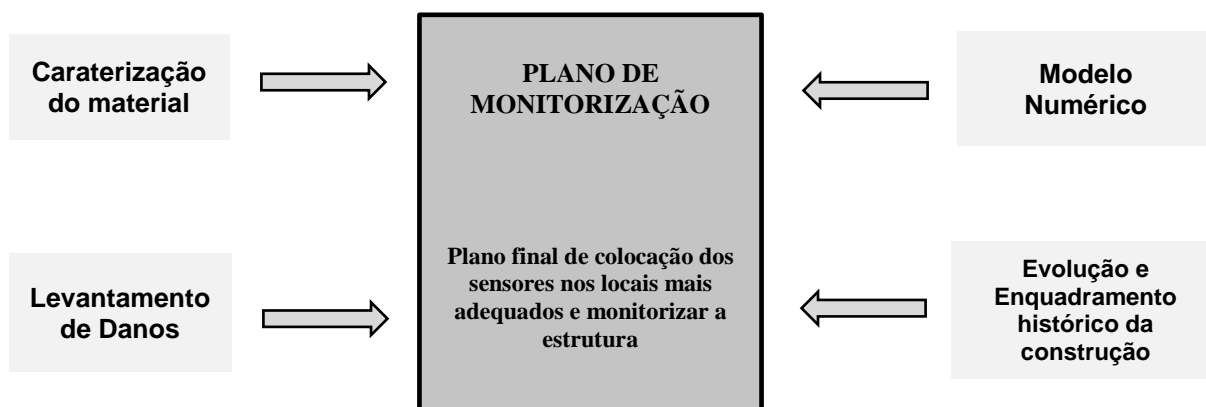


Fig. 5.1 - Processos realizados para concretização do plano de monitorização.

Para implementar o sistema de monitorização, isto é para definir o local onde seriam colocados os sensores foi essencial o estudo em torno da caracterização/levantamentos dos danos existentes e do modelo número da Igreja de São Lourenço, sendo assim possível observar em primeiro plano onde se localizavam os danos e posteriormente confrontar esse locais no modelo numérico.

A análise documental e a inspeção visual dos danos na Igreja, permitiu entender e conceber possíveis mecanismos de rotura relevantes de acordo com os cenários de danos encontrados. Foi ainda adicionada a medição realizada com a câmara termográfica que permitiu esclarecer dúvidas sobre a inexistência de humidades dentro da Igreja. Posteriormente as análises documentais e inspeções efetuadas, Recorreu-se ainda a informações geométricas fornecidas pelas entidades responsáveis pelo edifício, posteriormente as análises documentais e inspeções efetuadas, permitindo assim, construir um modelo numérico com simulações importantes para proceder ao planeamento da monitorização.

A colocação destes sensores, seguiu os dados previamente definidos e foram implementados sete sensores de fibra ótica com redes de Bragg, seis deles a medir deformação relativa em localizações como ilustrado na Fig. 5.2 (b) e um sétimo a medir variações de temperatura no interior da Igreja, junto ao local de medição dos restantes sensores.



Fig. 5.2 - Interior da Igreja de São Lourenço: a) capela de Santo Quintério; b) esquema do plano de monitorização.

Como se verifica no esquema, os sensores de deformação foram colocados estrategicamente considerando as características arquitetónicas do interior da Igreja (capela Santo Quintério),

particularmente a área da parede entre pilares da capela, para avaliar pano da parede com os tetos em arco, monitorizando os deslocamentos verticais, horizontais e diagonais do pano.

A fibra ótica utilizada, e onde se inscreveram as FBGs, é de sílica da Thorlabs, modelo GF1, com uma bainha de 125 μm (micrômetros) e um núcleo de 10 μm . Os seis sensores de deformação foram designados por:

- OFS-01 e OFS-04 para medir dos deslocamentos horizontais;
- OFS-02 e OFS-03 para medir os deslocamentos verticais;
- OFS-D01 e OFS-D02 para os deslocamentos na diagonal.

Estas fibras foram colocadas atrás da capela de Santo Quintério, como ilustrado na Fig. 5.2, uma vez que o local reunia as condições ideais para proceder a monitorização, isto é, o local escolhido apresentava inúmeras fissuras que tinham vindo a progredir, reunindo assim as condições ideais para o estudo em plano.

Selecionou-se a fibra ótica com redes de Bragg devido ao alto rendimento que é possível retirar do seu uso. A fibra ótica com o avanço da tecnologia tornou-se numa ferramenta muito útil na engenharia graças as suas inúmeras vantagens, quando comparados com sensores mais tradicionais. Neste sentido, e reforçando as vantagens de precisão de medição e a capacidade de multiplexagem, isto é, a capacidade de colocar várias FBGs em serie no mesmo cabo de fibra e registar vários parâmetros simultaneamente, fazem deste sensor uma ótima escolha para a monitorização estrutural, especialmente onde existe a necessidade de utilizar múltiplos sensores. No caso de estruturas históricas o reduzido impacto visual da fibra ótica apresenta-se também como uma vantagem importante a considerar. Este sistema SHM simplificado visa a leitura dos deslocamentos/deformações e variações de temperatura aproveitando o nível de alta precisão do sistema de aquisição, com a precisão na aquisição do comprimento de onda de Bragg na ordem de 1 picómetro (pm), como é possível verificar na ficha técnica do aparelho usado na campanha de monitorização (*Micron Optics sensing interrogator system, sm125-500 Field Module*).

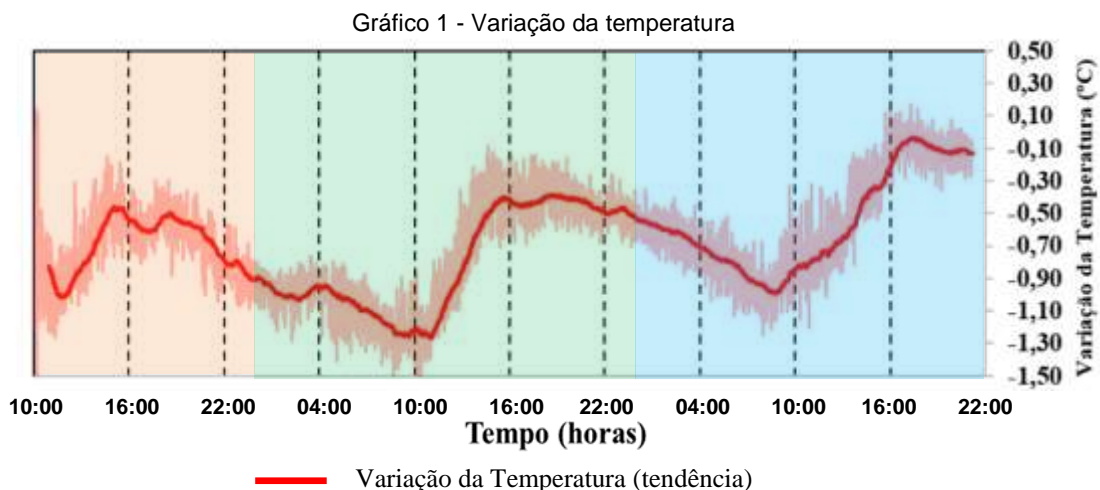
A campanha de monitorização, iniciou o registo dos primeiros dados às 10:00 horas de sexta-feira dia 12 de maio de 2017 tendo-se registado 60 horas, terminando assim o processo de recolha de dados as 22:00 do dia 14 de maio de 2017.

5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados obtidos pelo sistema de aquisição, foram captados em variação de comprimento de onda de Bragg, com elevada precisão graças a tecnologia da fibra ótica, onde posteriormente, com base nos ensaios de calibração dos sensores óticos em laboratório foi possível converter e interpretar os dados em forma de deslocamento relativo (μm) e variação da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), sendo assim mais claro e imediato a perceção dos resultados.

Uma vez que a recolha de dados incidiu sobre três dias distintos, decidiu-se meramente para análise e discussão de dados medidos, retratar os dois dias e meio, designando-os de ciclos diários. O termo ciclo diário é facilmente perceptível analisando o Gráfico 1 da variação de temperatura obtido na campanha de monitorização.

.



O gráfico 1 representa a variação da temperatura das 60 horas monitorizadas, e ainda os dois ciclos e meio mencionados acima, onde a área do gráfico a laranja representa o primeiro dia, a área verde o segundo dia e por fim a área a azul o terceiro e ultimo dia.

Pela análise, verifica-se que a monitorização começou as 10:00 horas onde se registou-se um ruído inicial muito por culpa da interferência humana na altura de colocação dos dispositivos em funcionamento. Posteriormente a esse ruído, constata-se que a temperatura sobe de uma forma linear até as 16:00 horas. Das 16:00 horas até ao fim do primeiro ciclo, 24:00 horas, a variação da temperatura decresce quase de uma forma linear, dando início ao segundo ciclo. O segundo ciclo dá continuidade ao decrescimento da variação da temperatura até sensivelmente as 09:00 do segundo dia. O crescimento novamente da variação da temperatura de forma linear, ocorre até as 16:00, muito semelhante ao ciclo anterior. Verifica-se novamente que das 16:00 horas do ciclo dois até as 09:00 horas do terceiro ciclo a variação da temperatura decresce quase linearmente, registando um crescimento linear da variação até as 18:00 horas.

Os dois ciclos e meio são muito semelhantes, na medida em que entre as 09:00 horas e as 11:00 existe uma concavidade positiva, verificando-se um crescimento linear no intervalo das 11:00 horas até as 18:00 horas, sensivelmente 8 horas. Quanto a concavidade negativa, esta encontra-se entre as 16:00 e as 18:00 dependendo da temperatura sentida no dia. Depois das 18:00 a tendência é decrescente até sensivelmente as 09:00 horas do ciclo seguinte. A única grande diferença contatada entre os ciclos é a amplitude das variações da temperatura em cada ciclo.

É importante referir que as variações térmicas sentidas no local de ensaio registaram amplitudes de variação de temperatura na ordem de 1.5 °C. Esta baixa amplitude é influenciada por vários fatores, tais como, a localização dos sensores, a inércia térmica do edifício e a falta de ventilação do local medido. No caso de estudo, o local monitorizado com pouco aceso e sem ventilação.

Finalizado a análise relativamente a variação da temperatura torna-se mais fácil compreender a análise da sua influencia na deformação do plano em estudo.

Para a analisar as deformações dadas pelos sensores, foram tomadas algumas decisões relativamente a forma como seriam comparados os dados entre si, mantendo sempre uma coerência e lógica nas decisões. Assim sendo, decidiu-se comparar os deslocamentos relativos da diagonal 1 (OFS-D01) com a diagonal 2 (OFS-D02), os deslocamentos horizontais (OFS-01) com o (OFS-04) e ainda os deslocamentos verticais (OFS-02) com o (OFS-03), sob a influência da temperatura nesses mesmos intervalos.

No entanto, é importante referir que os dados obtidos são escassos para se obter uma conclusão definitiva e verificar se existe uma razão de interferência das ações climáticas na variação do estado de tensão e deformação nas paredes do edifício em estudo. Todavia, uma aquisição mais ampla, com várias semanas de aquisição está já planeada para o mês de agosto de 2017, e este ensaio permitiu verificar a viabilidade e funcionalidade do sistema.

Sensores na diagonal (OFS-D01 e OFS-D02)

Relativamente aos resultados dos sensores OFS-D01 e OFS-D02 representados na Fig.5.3 sob a forma de esquema elucidativo para melhor compreensão do plano de monitorização. Os resultados obtidos foram tratados e corrigidos, isto é, tendo em conta a influência da temperatura no próprio sensor, isto porque uma FBG é simultaneamente afetada por deformações mecânicas e variações térmicas.

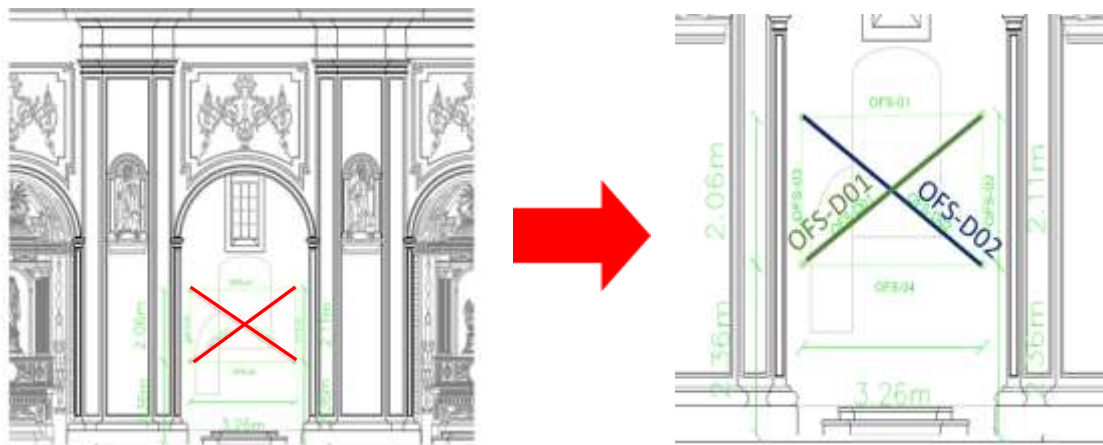


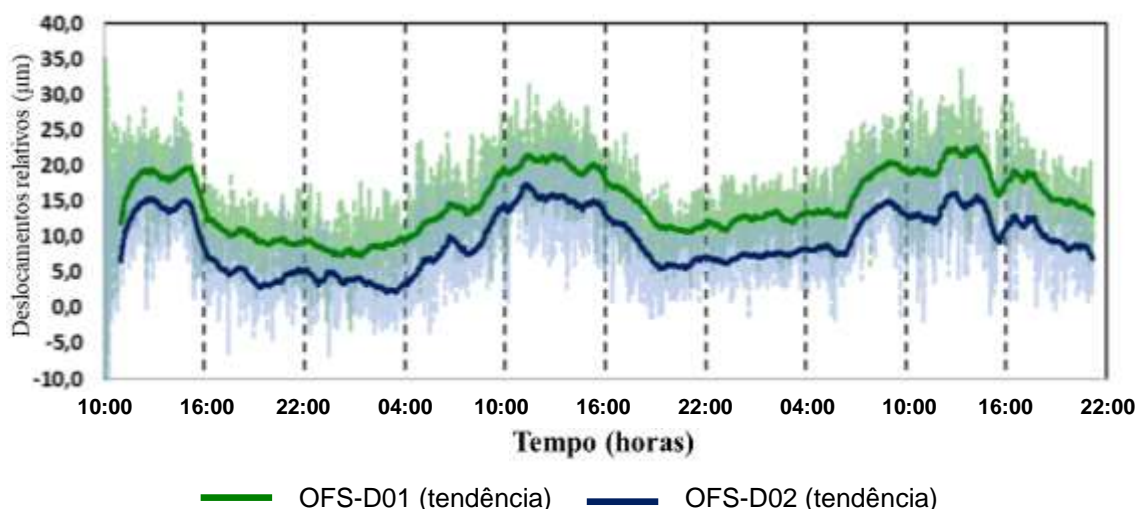
Fig 5.3 - Esquema do plano de monitorização dos sensores OFS-D01 e OFS-D02

A Fig.5.3 ilustra um esquema elucidativo dos sensores de fibra ótica com redes de Bragg, representam a OFS-D01 e a OFS-D02, medindo os deslocamentos diagonais do pano. O interesse da medição das diagonais tem relevância para entender as rotações ou distorções que o pano poderá ter quando submetido as variações térmicas.

Com isso, analisando os dados referentes a cada sensor através do Gráfico 2, que relaciona os deslocamentos relativos no tempo, é possível representar o comportamento mecânico do pano monitorizado durante os ensaios.

Visualizando os dados apresentados no Gráfico 2, facilmente se percebe que existe um padrão de acontecimentos, isto é, uma espécie de acontecimento repetitivo, fazendo lembrar os ciclos visualizados no gráfico da variação da temperatura.

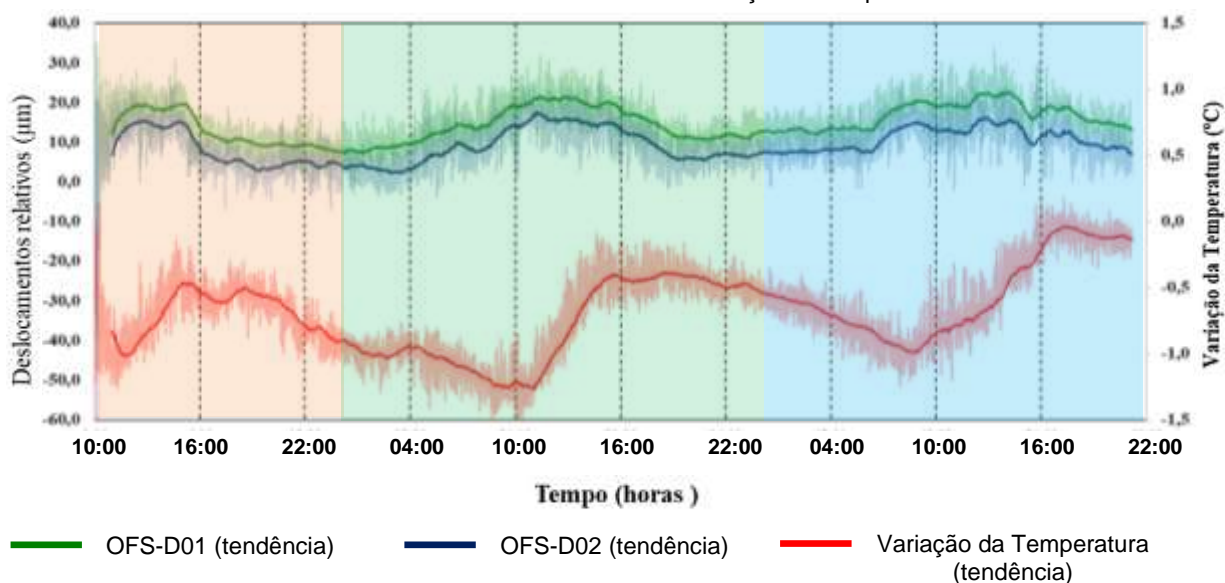
Gráfico 2 – Deslocamentos relativos da OFS-D01 e OFS-D02



Analisando o gráfico agora de uma forma mais profunda, consta-se que os deslocamentos relativos dos dois sensores são muito semelhantes, indiciando que os deslocamentos relativos de expansão e retração entre as duas diagonais ocorrem quase em simultâneo, e ainda realça que o plano de monitorização está bem executado, com consistência nos dados adquiridos.

Devido à alta precisão dos equipamentos usados, consegue-se distinguir três intervalos interessantes para avaliar com a variação da temperatura. Estes três intervalos, decorrem entre as 09:00 e as 17:00 em cada um dos dias monitorizados. Os intervalos mencionados, tem todos uma característica em comum a concavidade do gráfico é positiva indicando que ocorre uma mudança de declive nestes intervalos, seguindo as tendências da temperatura. No gráfico 3 representa-se também a variação de temperatura, para uma melhor perceção da sua influência nos deslocamentos relativos medidos.

Gráfico 3 - Deslocamentos relativos e variação da temperatura



Recorrendo novamente, aos ciclos diários referidos aquando da análise da variação da temperatura, verifica-se um comportamento muito semelhante dos deslocamentos nos três ciclos. Observando o gráfico 3, averigua-se que no intervalo das 09:00 até as 17:00 a variação da temperatura é linear e crescente e nos deslocamentos, nesse mesmo intervalo, ocorre uma mudança de declive, sinal que as tensões de compressão passaram para tensões de tração, denunciando a influência da temperatura nos deslocamentos. É de mencionar ainda, que nos intervalos onde não ocorrem variações térmicas acentuadas ou bruscas, em sensivelmente 15 horas, os deslocamentos relativos tendem a manter-se constantes oscilando suavemente. No entanto, é importante lembrar que a estrutura é muito complexa, sendo difícil perceber o comportamento estrutural do edifício. Verifica-se um desfazamento temporal entre as deformações medidas e a variações de temperatura no interior da igreja. A deformação começa a aumentar antes do início de incremento registado na temperatura, tal facto é esperado, porque a transferência de energia térmica nesta zona é realizada maioritariamente pelas paredes em si, ou seja, as paredes aquecem devido ao ciclo térmico, expandem e só posteriormente é que a variação de temperatura no interior da estrutura ocorre.

Sensores na horizontal (OFS-01 e OFS-04)

As fibras OFS-01 e OFS-04, são as responsáveis pelas medições horizontais efetuadas no plano da parede do edifício. Na Fig. 5.4 apresenta-se um esquema elucidativo para uma melhor compreensão do plano de monitorização e localização das fibras em análise. Os resultados obtidos foram tratados e corrigidos, isto é, tendo em conta a influência da temperatura.

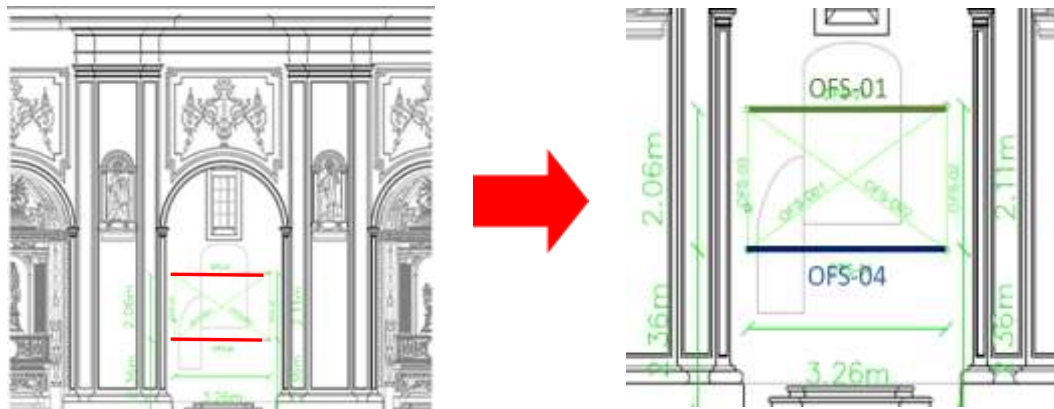
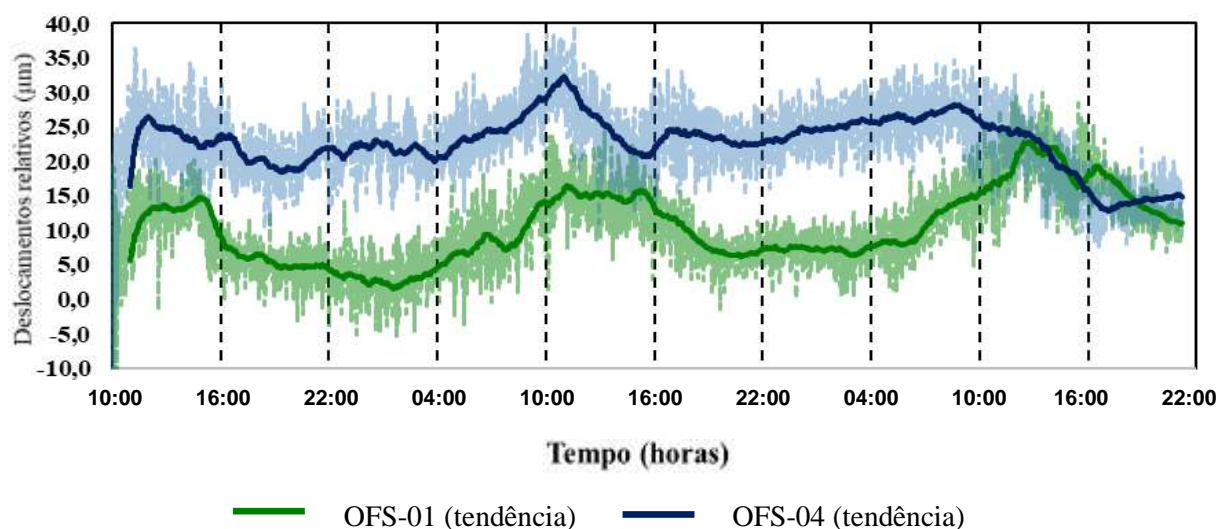


Fig. 5.4 - Esquema dos deslocamentos medidos com os sensores OFS-01 e OFS-04

Na análise dos dados presentes no Gráfico 4 correspondente aos deslocamentos relativos horizontais monitorizados, é importante ter em conta que neste género de estruturas antigas, a rigidez da estrutura varia muito. Tendencialmente, a rigidez junto ao base é mais elevada, muito por causa dos contrafortes que estes edifícios apresentam. Deste modo, é expectável, que as deformações junto a base sejam menos bruscas, e de menor amplitude, quando comparadas com as deformações junto aos tetos.

O Gráfico 4, representa os deslocamentos relativos horizontais do plano de monitorização, sendo o OFS-01 o mais afastado da base e o OFS-04 o mais próximo.

Gráfico 4 - Deslocamentos relativos da OFS-01 e OFS-04

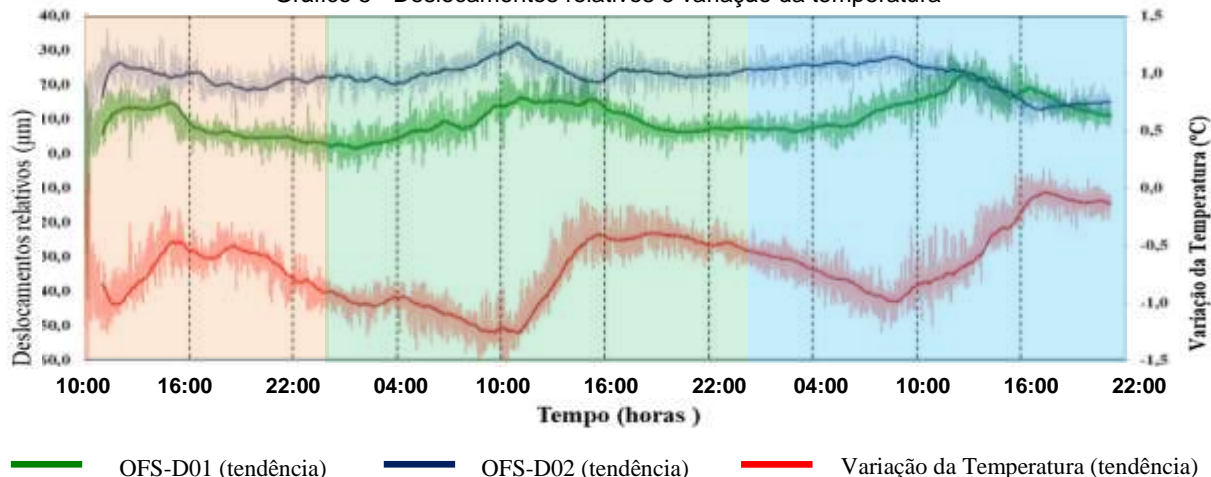


Fazendo uma primeira abordagem novamente, com o objetivo de observar se existe algum tipo de padrão, como verificado anteriormente, consta-se que os deslocamentos relativos horizontais não têm um padrão bem vincado ou tendencioso como foi possível constatar com maior facilidade nos gráficos 2 e 3.

No entanto, continua a salientar-se o interesse da análise dos intervalos entre as 10:00 e as 16:00, pois tal como nos casos anteriores, é neste intervalo que as deformações se alteram com o ciclo térmico, apoiando esta hipótese com a mudança de declive do gráfico obtido. Relativamente à semelhança nos deslocamentos, tal como esperado, as fibras OFS-01 e a OFS-04, não apresentam comportamento muito semelhante pois, a influência da rigidez da estrutura é salientada, isto é, a estrutura é mais rígida junto da base o que confere deslocamentos relativos menos acentuados dos que ocorridos na parte junto a cúpula.

Para melhor compreensão da influência da temperatura nos deslocamentos relativos horizontais, o Gráfico 5 junta, a variação da temperatura com os deslocamentos relativos durante as 60 horas de monitorização, sendo assim mais fácil evidenciar os acontecimentos.

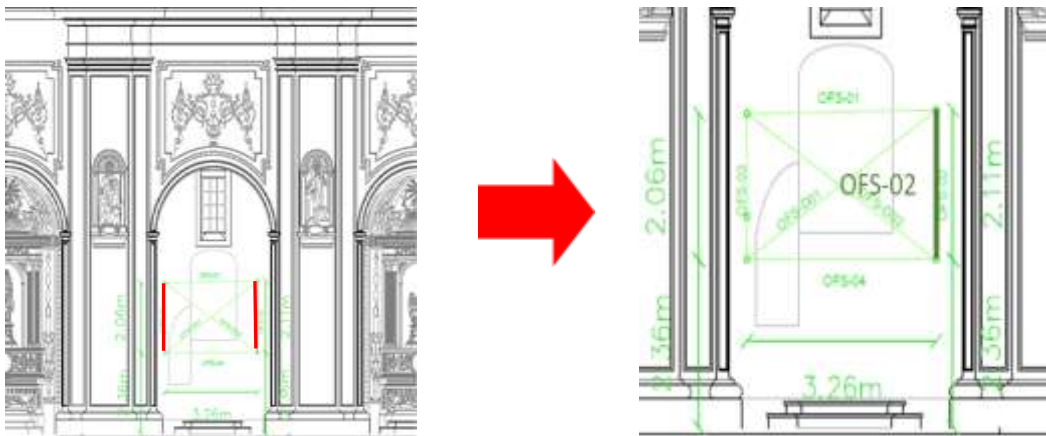
Gráfico 5 - Deslocamentos relativos e variação da temperatura



Apesar dos deslocamentos não apresentarem comportamento muito semelhante devido ao elevado grau de complexidade da estrutura, analisando os dados do Gráfico 5, verifica-se que quando ocorre a variação da temperatura mais acentuadas, os deslocamentos são mais oscilatórios. Por outro lado, quando a variação da temperatura ocorre num longo período, os deslocamentos relativos variam muito pouco. Isto poderia ser explicado através da elevada inércia térmica deste género de edifício, mas devido a complexidade inerente a estrutura é necessário maior quantidade de informação, num intervalo de tempo mais alargado, para melhores conclusões. Todavia, verifica-se que o sensor OFS-01 tem a resposta que melhor acompanha a tendência do ciclo térmico o que, tal como referido, pode estar relacionado com a sua maior distância aos contrafortes e fundações, o que diminui sua rigidez.

Sensores na vertical (OFS-02 e OFS-03)

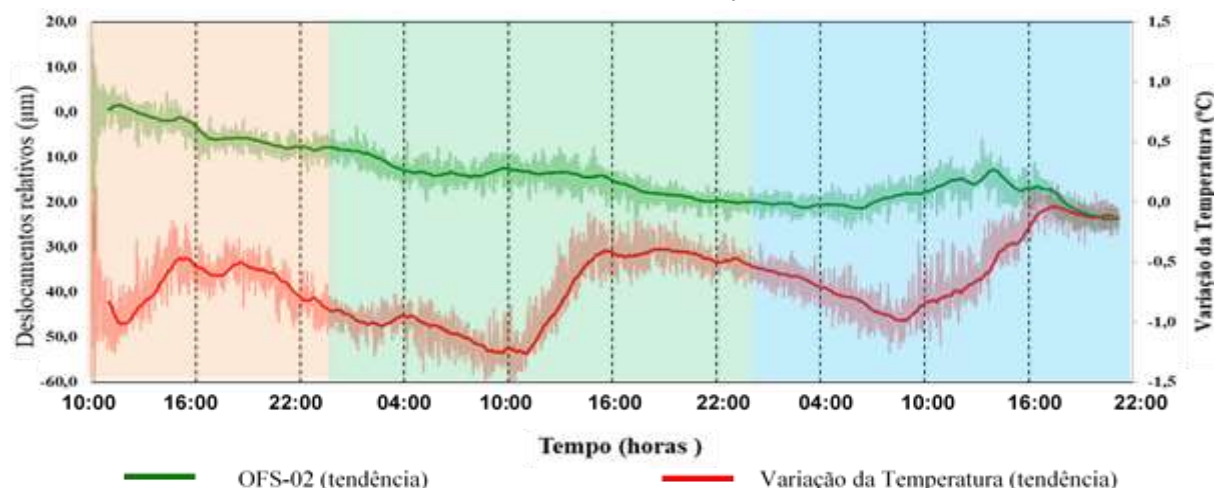
Relativamente aos resultados dos sensores OFS-02 e OFS-03 representados na Fig.5.5 sob a forma de esquema elucidativo para melhor compreensão do plano de monitorização. Os resultados obtidos foram tratados e corrigidos, isto é, tendo em conta a influência da temperatura.



A fibra OFS-02 foi a mais regular, verificando-se uma contração com uma tendência quase linear durante o tempo de monitorização.

Para melhor compreensão da influencia da temperatura nos deslocamentos relativos verticais, o Gráfico 7 junta, a variação da temperatura com os deslocamentos relativos durante as 60 horas de monitorização.

Gráfico 7 - Deslocamentos relativos e variação da temperatura



Outro ponto interessante refletir nesta fibra, são os ciclos que anteriormente eram mais fáceis de visualizar, sendo que neste caso, OFS-02, não são tão perceptíveis. Salienta-se ainda que, no caso do terceiro ciclo térmico, é ainda possível identificar a variação de deformação, devido à maior variação térmica desse ciclo. É importante salientar que estamos a analisar deformações relativas em estruturas complexas, para variações térmicas da ordem de 1°C, pelo que numa monitorização de maior duração temporal, com variações térmicas mais acentuadas, será de esperar uma deformação relativa muito mais evidente e de amplitude superior.

Após a análise efetuada, confrontando os deslocamentos relativos verticais, horizontais e diagonais registados com a variação da temperatura, procedeu-se a uma análise de dependência, de forma a explorar e inferir a relação entre as variáveis em estudo, deslocamentos e temperatura. Deste modo, recorrendo a uma regressão linear, analisou-se a possível dependência dos deslocamentos sentidos em função das variações térmicas sentidas.

Analisados os dados e tendo em conta que os dados obtidos durante a campanha de monitorização refletem apenas 60 horas do comportamento estrutura, é importante referir que do ponto de vista estatístico os dados são escassos para poder concluir qual a dependência entre as variáveis em estudo.

No entanto, procedeu-se ainda assim ao estudo da regressão, neste caso linear para verificar qual seria o coeficiente de determinação, servindo de ponto de partida para estudos futuros.

O coeficiente de regressão/corelação (R^2), é uma forma de avaliar a qualidade do ajuste do modelo, isto é, o R^2 indica quanto o modelo/equação é capaz de explicar os dados coletados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, sendo que quanto maior o R^2 mais explicativo é o modelo melhor se ajustando à amostra. (Citar um livro)

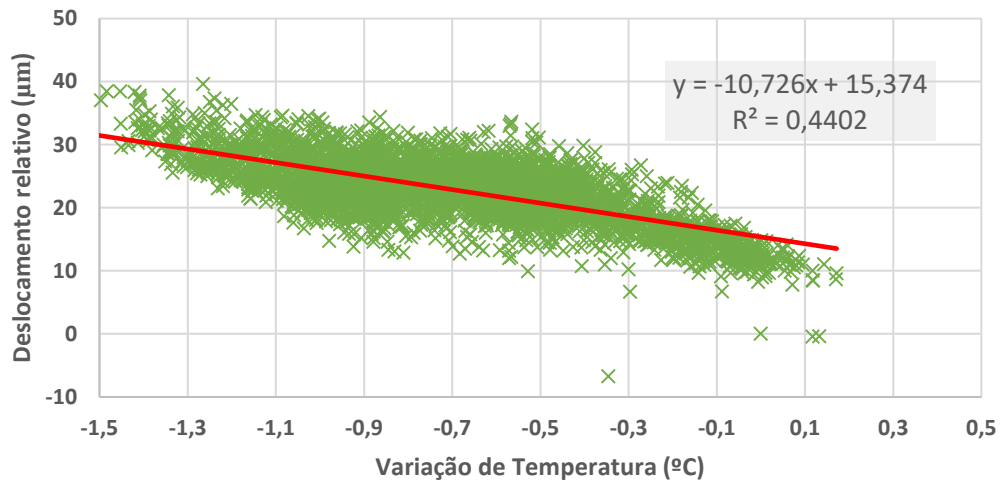
Entre os dados observados, salienta-se apenas os obtidos pela fibra OFS-04, pois foi a única que obteve um coeficiente de determinação com significado estatístico. Quanto as outras fibras, o coeficiente de

determinação observado era muito baixo, isto é, sem sentido estatístico estando na ordem dos 0.04 a 0.15.

Quanto à fibra OFS-04, apesar do valor do coeficiente de determinação ainda estar aquém das expectativas do ponto de vista estatístico, não deixa de ser um ponto de partida e uma motivação para continuar este género de estudos.

O gráfico 8, reflete os dados adquiridos durante a campanha de monitorização, sendo sido registado 60 horas 60.

Gráfico 8 - Regressão linear dos dados obtidos da OFS-04



A regressão linear, demonstrou a possível existência de uma relação entre os deslocamentos monitorizados com a variação da temperatura, relativamente aos dados obtidos pela OFS-04, sendo essa dependência de 44.02 %.

6 CONCLUSÕES

A construção civil é uma atividade cada vez mais exigente, tendo atingido elevado nível de evolução em termos de segurança, nas últimas décadas.

Com isso, o restauro, preservação e segurança do edificado com valor patrimonial tornou-se um assunto de interesse, uma vez que a manutenção destes edifícios com valor histórico converge para o incremento na atividade turística, bem como para a ligação da sociedade com o seu passado. Considera-se ainda relevante o estudo dos sistemas estruturais destas construções, baseados, fundamentalmente, em paredes resistentes e na ligação entre elementos construtivos em permanente degradação, ainda pouco estudados pelo meio técnico-científico, se comparado, por exemplo com estruturas de betão armado. Complementarmente, a preservação deste género de edifício salvaguarda a transmissão cultural para as gerações futuras e assim, imortalizar a história que nos caracteriza.

Neste contexto, e à luz dos avanços tecnológicos no âmbito dos sistemas sensoriais ocorridos nos últimos 20 anos, os sistemas de monitorização estrutural tem desempenhado um papel muito importante na aquisição de informação sobre o comportamento estrutural das construções patrimoniais, especialmente no que diz respeito aos efeitos ambientais. E ainda, mais recentemente, a aplicação de técnicas baseadas no uso de fibras óticas, como por exemplo redes de Bragg, revolucionaram a forma como observamos o comportamento estrutural, pela aquisição de dados precisos (para o caso de deslocamentos relativos, por exemplo, o nível de medição pode ser abaixo da ordem dos micrómetros), com potencial de multiplexação de vários sensores na mesma fibra, passivos (sem eletricidade no ponto de medida, o que minimiza o risco de curto-circuito e incêndio) e com muito baixo peso e impacto visual.

Os sensores FBG tem contribuído em larga escala para os avanços tecnológicos na área dos sensores de fibra ótica, sendo hoje objeto de investigações com interesse para sua aplicação não só na construção civil, como também na área da saúde, monitorização de aeronaves, embarcações, entre outras aplicações. Assim, na presente dissertação foi possível demonstrar mais uma vez, as potencialidades que esta tecnologia é capaz de promover na área da engenharia.

No que diz respeito ao sistema de monitorização da Igreja São Lourenço, podemos afirmar que o sistema aplicado na Igreja apresentou funcionamento compatível com o esperado, podendo ainda ser empregado para uma monitorização mais prolongada no tempo, pois através dos resultados recolhidos, num curto período temporal de monitorização, foi possível observar a elevada precisão dos dados adquiridos, destacando a importância e vantagem inerente às fibras óticas com redes de Bragg.

Além de permitir avaliar a progressão dos deslocamentos relativos do plano monitorizado, no caso em concreto da monitorização da Igreja dos Grilos, este trabalho permitiu o estudo do efeito da variação da temperatura nos deslocamentos da alvenaria monitorizada. De um modo geral, foi possível verificar que

os deslocamentos monitorizados (devidamente corrigidas para remover o efeito da temperatura na fibra de sílica) não são significativos de maneira a representar ameaça para a estrutura da Igreja. No entanto é importante lembrar que a campanha de monitorização efetuada foi realizada num muito pequeno intervalo temporal, sendo necessário uma campanha mais prolongada para melhor compreender os fenómenos ocorridos no processo.

Porém, os resultados obtidos são encorajadores pois, apesar do pouco tempo de monitorização dos deslocamentos relativos da Igreja de São Lourenço, foi possível verificar que existe um comportamento padrão que se relaciona com as variações da temperatura no interior da Igreja, o que revela alguma influência da temperatura nas características mecânicas dos materiais, apesar da muito pequena variação térmica ocorrida no intervalo temporal analisado (cerca de 1°C). No seguimento, foi possível verificar uma relação entre os deslocamentos horizontais, medidos pela fibra OFS-04 com coeficiente de dependência de 44.02%. Para os restantes sensores, é necessário um maior tempo de monitorização para que esta relação entre temperatura e deslocamento seja definida.

Por fim, constatou-se que as variações no interior da Igreja foram muito suaves, isto é, variaram em média 1.0°C, valor este muito baixo quando comparado com a variação média da temperatura no exterior, registrando valores de variação da ordem dos 8°C.

Desenvolvimentos Futuros

No que se refere à continuidade deste trabalho, seria interessante realizar e o desenvolver algumas práticas no futuro, de forma a complementar, aperfeiçoar e aprofundar conteúdos descritos nesta dissertação e principalmente para melhor compreender a estrutura em estudo, a Igreja de São Lourenço, sendo proposto os seguintes trabalhos:

- Monitorizar o edifício durante um longo período, de preferência a apanhar as mudanças sazonais de forma a verificar as influências das variações térmicas nas várias estações do ano. Salienta-se ainda a importância de medir as variações térmicas no exterior do edifício para posterior comparação com as variações sentidas no interior.
- Desenvolver um estudo estrutural ao nível da modelação numérica de todo o complexo (Igreja e Seminário) visto que os dados detetados afetam todo o complexo e não apenas a Igreja;
- Efetuar uma prospeção ao solo de toda a envolvente e desenvolvimentos de estudos de interação solo estrutura, para melhor compreender a influência do deslocamento do terreno face as fissuras existentes em progressão contínua;
- Concretizar um estudo, analisando o efeito do tráfego do túnel com os deslizamentos do terreno, e como influência a estrutura;
- Realizar uma campanha experimental com ensaios dinâmicos na Igreja, com acelerómetros para a calibração do modelo numérico, e assim validar as propriedades dinâmicas da estrutura.;
- Por fim, seria interessante desenvolver/otimizar suportes e encapsulamentos da fibra de sílica com as redes de Bragg, de forma a facilitar o transporte e a instalação dos sensores.

Bibliografia

- Abruzzese, D, et al.
2009 Long life monitoring of historical monuments via wireless sensors network. *Wireless Communication Systems*, 2009. ISWCS 2009. 6th International Symposium on, 2009, pp. 570-574. IEEE.
- Antunes, Paulo, et al.
2015 Liquid level gauge based in plastic optical fiber. *Measurement* 66:238-243.
- Antunes, Paulo Fernando da Costa
2011 Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas. Dissertação de Douturamento, Departamento de Física, Universidade de Aveiro.
- Antunes, Paulo, et al.
2012a Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study. *Measurement* 45(7):1695-1705.
- Antunes, Paulo, et al.
2012b Structural health monitoring of different geometry structures with optical fiber sensors. *Photonic Sensors* 2(4):357-365.
- Arêde, António, and Aníbal Costa
2002 Inspecção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas. Algumas contribuições da FEUP. Actas do 1º Seminário "A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação".
- Barrias, António, Joan R Casas, and Sergi Villalba
2016 A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors* 16(5):748.
- Bergmeister, Konrad
2003 Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures: State-of-art Report. Volume 22: fib Fédération internationale du béton.
- Binda, L, A Saisi, and C Tiraboschi
2000 Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials* 14(4):199-233.
- Bisby, Luke A, and MB Briglio
2004 ISIS Canada Educational Module No. 5: An Introduction to Structural Health Monitoring. Prepared by ISIS Canada 3.
- Brandão, F, et al.
2016 Caracterização Dinâmica de um Edifício Histórico do Século XIX Construído em Alvenaria de Tijolos Maciços.
- Czichos, Horst
2013 Handbook of technical diagnostics: Fundamentals and application to structures and systems: Springer Science & Business Media.
- Daum, Werner
2013 Guidelines for structural health monitoring. *In Handbook of Technical Diagnostics*. Pp. 539-541: Springer.
- de Almeida, Celeste Maria Nunes Vieira
2013 Paredes de Alvenaria do Porto. Tipificação e Caracterização Experimental. Dissertação de Douturamento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- de Atenas, Carta
1999 Carta de Atenas. *Cadernos de Sociomuseologia* 15(15).
- de Battista, Nicholas, et al.
2015 Measuring and modelling the thermal performance of the Tamar Suspension Bridge using a wireless sensor network. *Structure and Infrastructure Engineering* 11(2):176-193.
- Di Sante, Raffaella
2015 Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications. *Sensors* 15(8):18666-18713.
- Doebeling, Scott W, Charles R Farrar, and Michael B Prime

- 1998 A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest* 30(2):91-105.
- Doebling, Scott W, et al.
1996 Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review.
- Farrar, Charles R, and Keith Worden
2007 An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365(1851):303-315.
- Félix, Carlos Manuel da Silva
2012 Monitorização e análise do comportamento de obras de arte.
- Figueiredo, Elói João Faria
2012 Monitorização e avaliação do comportamento de obras de arte. Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Fraser, Michael, et al.
2009 Sensor network for structural health monitoring of a highway bridge. *Journal of Computing in Civil Engineering* 24(1):11-24.
- Ko, JM, and YQ Ni
2005 Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering structures* 27(12):1715-1725.
- Lopes, Daniel Oliveira
2011 A Reabilitação Urbana em Portugal-Importância Estratégica para as Empresas do Setor da Construção Civil e Obras Públicas. dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Lorenzoni, Filippo
2013 Integrated methodologies based on Structural Health Monitoring for the protection of Cultural Heritage buildings, University of Trento.
- Marques, Leandro
2008 Monitorização estática e dinâmica: aplicações. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Martins, Nuno, et al.
2014 Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response. *Engineering Structures* 59:80-94.
- Mesquita, E., Paupério, E., Arêde, A., Varum, H.
2015 Boletim Técnico Nº11-Characterização, avaliação e recuperação estrutural de construções. ALCONPAT Internacional, Mérida.:19.
- Mesquita, Esequiel, et al.
2016 Global overview on advances in structural health monitoring platforms. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 6(3):461-475.
- Mesquita, E., Arede, A., Paupério, E., Pinto, N., Antunes, P and Varum, H.
2016 SHM of heritage constructions through wireless sensor network: from design to the long-term monitoring.
- Milani, Gabriele
2013 Lesson learned after the Emilia-Romagna, Italy, 20–29 May 2012 earthquakes: a limit analysis insight on three masonry churches. *Engineering Failure Analysis* 34:761-778.
- Mufti, Aftab A
2002 Structural health monitoring of innovative Canadian civil engineering structures. *Structural Health Monitoring* 1(1):89-103.
- Nogueira, Rogério Nunes
2005 Redes de Bragg em fibra óptica. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Física, Universidade de Aveiro.
- Pinho, Fernando FS
2003 Construções em Alvenaria de Pedra Tradicional. Principais Anomalias e Técnicas de Reabilitação. Publicação UNIC, Outubro de.
- 2007 Paredes de alvenaria ordinária: estudo experimental com modelos simples e reforçados. Dissertação de Mestrado., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.
- Rainieri, C, G Fabbrocino, and E Cosenza

- 2009 Fully automated OMA: an opportunity for smart SHM systems. Proceedings, International Modal Analysis Conference (IMAC), 2009, pp. 9.
- Rego, João
2016 Desenvolvimento de um Plano de Monitorização a Implementar na Igreja de São Lourenço. Dissertação de Mestrado., Departamento Engenharia Civil, Universidade Porto.
- Ribeiro, António Barbosa Lobo
1996 Esquemas de multiplexagem de sensores de fibra óptica. Dissertação de Douturamento, Departamento de Física, Universidade do Porto.
- Rodrigues, Carlos Filipe Guedes
2011 Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica. Dissertação de Douturamento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Rodrigues, Carlotta
2016 Structural Health Monitoring for Historical buildings - Case studies: Igreja dos Grilos in Oporto and masonry bridge in Vila Fria. Porto, Spienza-Universita' di Roma, Roma.
- Roque, João C Almendra
2002 Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria. Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Roseiro, Joana Raquel Farias
2012 Causas anomalias e soluções de reabilitação estrutural de edifícios antigos: estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Silva, Bruno, João Miranda Guedes, and Aníbal Costa
2010 Estratégias de Modelação Numérica no estudo de Estruturas Históricas. Experiência do NCREP (FEUP). Congresso Património 2010, 2010.
- Silva, Rui André Martins
2008 Caracterização experimental de alvenaria antiga: reforço e efeitos diferidos. Dissertação de Douturamento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Sohn, Hoon, et al.
2003 A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory.
- Tennyson, RC, et al.
2001 Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. Smart materials and Structures 10(3):560.
- Vázquez, I
2005 A Reabilitação do Património Edificado no Contexto da Regeneração Urbana. 2.º Seminário-A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação.
- Worden, Keith, et al.
2007 The fundamental axioms of structural health monitoring. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. Vol. 463, pp. 1639-1664. The Royal Society.
- Wu, Jian, et al.
2010 Multi-agent system design and evaluation for collaborative wireless sensor network in large structure health monitoring. Expert Systems with Applications 37(3):2028-2036.
- Zhou, Linren, et al.
2013 Review of benchmark studies and guidelines for structural health monitoring. Advances in Structural Engineering 16(7):1187-1206.
- Zhu, Benjin, and Dan M Frangopol
2013 Incorporation of structural health monitoring data on load effects in the reliability and redundancy assessment of ship cross-sections using Bayesian updating. Structural Health Monitoring 12(4):377-392.